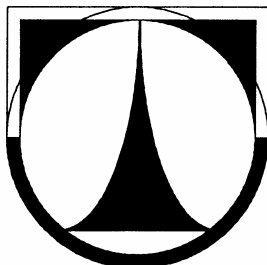


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie



**Vliv mezery v kořeni na efektivitu provedení koutového
svaru metodou MAG**

**The influence of fillet joint gap on the weld deposition
efficiency of GMAW**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Jiří Korejza

Květen 2007

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program M 2301- Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

**Vliv mezery v kořeni na efektivitu provedení koutového
svaru metodou MAG**

**The influence of fillet joint gap on the weld deposition
efficiency of GMAW**

Jiří Korejza

KSP-SM-526

Vedoucí diplomové práce: Doc.Ing. Heinz Neumann, CSc. – *TU v Liberci*

Konzultant diplomové práce: Ing. Zdeněk Hudec, Ph.D. – *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	81
Počet tabulek	23
Počet příloh	0
Počet obrázků	79
Počet grafů	8

25.5.2007

Originální zadání DP

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: M2301-Strojní inženýrství
Diplomant: Jiří Korejza
Téma práce: Vliv mezery v kořeni na efektivitu provedení koutového svaru metodou MAG

The influence of fillet joint gap on the weld deposition efficiency of GMAW

Číslo DP: KSP-SM-526

Vedoucí DP: Doc.Ing. Heinz Neumann, CSc. -*TU v Liberci*
Konzultant : Ing. Zdeněk Hudec, Ph.D. -*TU v Liberci*

Abstrakt:

Tato práce řeší formou experimentální studie vliv mezery na efektivitu vytvoření koutového svaru a navazuje na předchozí práce, ve kterých byla vytvořena metodika měření a optimalizace efektivitu provedení svaru a aplikována na různé systémy zdroj-drát-plyn. Zahnutím mezery v kořeni svaru do souboru proměnných se tato metodika přiblížila reálným podmínkám koutového svaru ve výrobě. Výsledky práce ukazují, že mezera může mít za určitých podmínek příznivý vliv na efektivitu provedení svaru a tyto podmínky specifikuje pro soubor - drát \varnothing 1,2 – plyn 68Ar/20He/12CO₂, které byly již optimalizovány bez mezery.

Abstract:

This paper in the form of experimental study deals with the influence of of fillet joint gap on the weld deposition efficiency. The study follows another works where fillet weld efficiency measuring and optimization was proposed and examined for various source-wire-gas systems. The influence of joint gap involving to set of variables enables to reach this method to common praxis usage. Results of this work shows conditions when gap has beneficial effect to weld deposition efficiency for 1,2 mm solid wire - 68Ar/20He/12CO₂ shielding gas system that was previously optimized without of gap influence.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2007

.....
Jiří Korejza
Dražická 180/8
294 71 Benátky nad Jizerou

Poděkování

Na úvod této diplomové práce bych rád poděkoval:

Doc. Ing. Heinzu Neumannovi, CSc. a Ing. Zdeňku Hudcovi, Ph.D. za podnětné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Také bych rád poděkoval svým rodičům za projevenou trpělivost a podporu při studiu na vysoké škole.

OBSAH

1. ÚVOD	8
2. TEORETICKÁ ČÁST	10
2.1 Charakteristika procesu svařování metodou MAG	10
2.1.1 Definice procesu, principy	10
2.1.2 Svařovací zdroje	11
2.1.3 Svařovací dráty	12
2.1.4 Ochranné plyny	13
2.2 Svařovací parametry a podmínky	14
2.2.1 Svářecí proud	15
2.2.2 Svářecí napětí	16
2.2.3 Rychlost sváření	17
2.3 Teorie tavení drátu	18
2.4 Intenzita svařování MAG	20
2.4.1 Základní podmínky intenzity svařování MAG	21
2.4.2 Intenzita zkratového přenosu kovu	22
2.4.3 Intenzita sprchového přenosu kovu	23
2.4.4 Intenzita vysokoproudého oblouku	25
2.5 Efektivita provedení koutového svaru metodou MAG	26
2.5.1 Efektivita z konstrukčního hlediska	27
2.5.2 Efektivita z technologického hlediska	29
2.5.2.1 Efektivita (účinnost) přenosu tepla u procesu MAG	30
2.5.2.2 Efektivita přenosu tepla obloukem η_a	30
2.5.2.3 Efektivita tavení materiálu η_m při přenosu tepla vedením	30
2.5.2.4 Efektivita tavení materiálu η_m při přenosu tepla prouděním	32
2.5.3 Efektivita závaru (EZ)	34
2.5.3.1 Vliv proudu I , rychlosti drátu V_d , tavného výkonu P na EZ	35
2.5.3.2 Vliv výletu drátu, délky oblouku, výšky kontaktní špičky na EZ	35
2.5.4 Synergie	36
2.5.5 Šumové faktory mající vliv na efektivitu svařování	37
2.5.5.1 Vliv mezery v kořeni svaru	38
2.5.6 Metodika měření efektivy koutového svaru	38
2.5.6.1 Matematické řešení závarem řízené geometrie svaru	39
2.5.6.2 Stanovení faktorů efektivy provedení svaru	40
2.6 Optimalizace procesu	41
2.6.1 Metoda centrální kompozice	41
2.7 Hodnocení vad a určování stupňů jakosti koutového svaru dle ČSN EN ISO 5817	42
2.7.1 Špatné sestavení koutových svarů	42
2.7.2 Zápal	43
2.7.3 Nadměrné převýšení koutového svaru	43
2.7.4 Strmý přechod svaru	44
2.7.5 Nadměrná asymetrie koutového svaru	45
2.7.6 Pórovitost kořene	45
2.7.7 Podkročení velikosti koutového svaru	45
2.7.8 Překročení velikosti koutového svaru	46
2.7.9 Trhlina	47
2.7.10 Pórovitost a shluky pórů	47
2.7.11 Vícenásobné vady	48

3.EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	49
3.1 Cíl práce	49
3.2 Pracoviště a použítá zařízení	49
3.2.1 Laboratoř automatického svařování MAG	49
3.2.1.1 Příslušenství	50
3.2.1.2 Přídavný materiál	50
3.2.1.3 Ochranný plyn	50
3.2.1.4 Parametry svařovaných vzorků	50
3.2.1.5 Způsob svařování vzorků	51
3.2.1.6 Monitorování svařovacích parametrů procesu MAG pomocí programu WeldMonitor 3.0	52
3.2.2 Laboratoř pro vyhodnocování makrosnímku	54
3.3 Návrh experimentu	56
3.3.1 Zkušební svary	56
3.3.1.1 Opravné zkušební svary	57
3.3.2 Měření excentricity závaru	61
3.3.3 Experimentální program optimalizace efektivity E – plech 8 mm	63
3.3.4 Experimentální program optimalizace efektivity E – plech 12mm	66
3.4 Zhodnocení a porovnání výsledků	70
3.5 Kontrola jakosti svaru	76
4. ZÁVĚR DIPLOMOVÉ PRÁCE	77
5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	78

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

MAG	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
F_γ	síla povrchového napětí kapky [F]
F_G	gravitační síla [F]
F_{em}	elektromagnetická síla [F]
F_s	síla aerodynamického tahu plynu [F]
I	proud [A]
U	napětí [V]
U_0	napětí na prázdno [V]
v_d	rychlost drátu [$m \cdot min^{-1}$]
v_s	rychlost svařování [$m \cdot min^{-1}$]
h_a	hloubka převýšení [mm]
h_a	hloubka závaru [mm]
v_p	rychlost plynu [$m \cdot min^{-1}$]
L	výlet drátu [mm]
L_o	délka oblouku [mm]
$L_c, CTWD$	vzdálenost kontaktní špičky nad povrchem [mm]
v	účinná výška koutového svaru [mm]
v_t	efektivní výška svaru [mm]
z	hloubka závaru [mm]
a	jmenovitá velikost koutového svaru [mm]
a_t	efektivní velikost návaru [mm]
b, c	strany koutového svaru [mm]
w	šířka housenky [mm]
w_s	střední hodnota šířky housenky [mm]
r	převýšení svaru [mm]
A_p	projekční plocha [mm^2]
C_D	koeficient tažení [-]
η_a	efektivita přenosu tepla obloukem [-]
η_m	efektivita tavení materiálu
P_M	výpočtová průřezová plocha návaru [mm^2]
P_N	plocha návaru změřená z makrosnímku [mm^2]
P_S	průřezová plocha svaru [mm^2]
E_N	efektivita návaru svaru [-]
E_z	efektivita závaru svaru [-]
E	celková efektivita provedení svaru [-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast

1. ÚVOD

V dnešní době jsou kladeny velké nároky na vysokou jakost a zároveň, co nejmenší vstupní náklady na výrobek. V technologii svařování jsou výrobní tolerance nezbytné pro hospodárnou výrobu dílů, ale na druhou stranu snižují efektivitu vlastní technologie. Mezera mezi jednotlivými díly může vzniknout jak z přípravy polotovaru, tak při samotném sváření vlivem deformací způsobených vnášením velkého množství tepla. Technologie MAG svařování drátem v ochranném plynu je ideální pro svařování konstrukčních dílů tím, že taví zhruba stejným dílem přídavný i základní materiál, takže bez problému vyplňuje technologicky nutné mezery včetně rozměrových tolerancí dílů i nepřesnosti vedení hořáku. Na druhou stranu o produktivitě výroby rozhoduje intenzita procesu a existují technologie, jejichž intenzita je mnohem vyšší – např. plasma a laser. Jejich praktické použití v původní podobě je omezeno vysokými nároky na přesnost, takže je stejně nutno kombinovat s tavením drátu. Mnohem závažnější jsou jejich vysoké pořizovací a provozní výdaje.

Z tohoto důvodu byl v minulých letech na katedře KSP proveden v rámci disertační práce [1] výzkum optimalizace efektivity provedení koutového svaru, kde byly zkoumány podmínky maximální intenzity procesu MAG v daných podmínkách pro zhotovení přijatelného svaru. Pro objektivní posouzení a srovnání intenzity procesu za různých vstupních podmínek bylo vždy svařováno bez mezery. Vliv mezery byl zkoumán jen jako vedlejší produkt u svarů náhodně provedených na prohnutou pásnici, čímž vznikla v některých místech mezera. Při vyhodnocování zkoušek bylo zjištěno, že v místech, kde byla mezera došlo k menšímu převýšení svaru, než tomu bylo v místech těsného styku stojny s pásnicí, také efektivní prohloubení závaru se zvýšilo. Tento jev je totožný se svařováním dvou dílů tupým jednovrstvým svarem, kde je prokázáno, že ponecháním mezery mezi dvěma plechy se sníží nežádoucí převýšení a zvýší efektivita provedení svaru. Rozdíl je pouze v tom, že u koutového svaru není možno oblouk směřovat přímo do mezery. Pro efektivní vytvoření koutového svaru s maximální hloubkou závaru v mezeře bude nutno vhodně kombinovat šířku mezery s excentricitou vedení hořáku a to je úkolem této diplomové práce.

Tato práce vychází z teoretických i prakticky ověřených poznatků proudění ve svarové lázni, které ovlivňuje velikost a tvar závaru a má za úkol zjistit vliv vnesené mezery, jako menší překážky při vytváření hlubokého závaru na efektivitu vytvoření koutového svaru.

Práce navazuje na výsledky a zkušenosti získané na katedře strojírenské metalurgie, zejména na práci Ing. Zdeňka Hudce, Ph.D. [1] a přímo navazuje na diplomovou práci [2] optimalizace efektivit provedení svaru bez mezery, se kterou budou výsledky srovnávány.

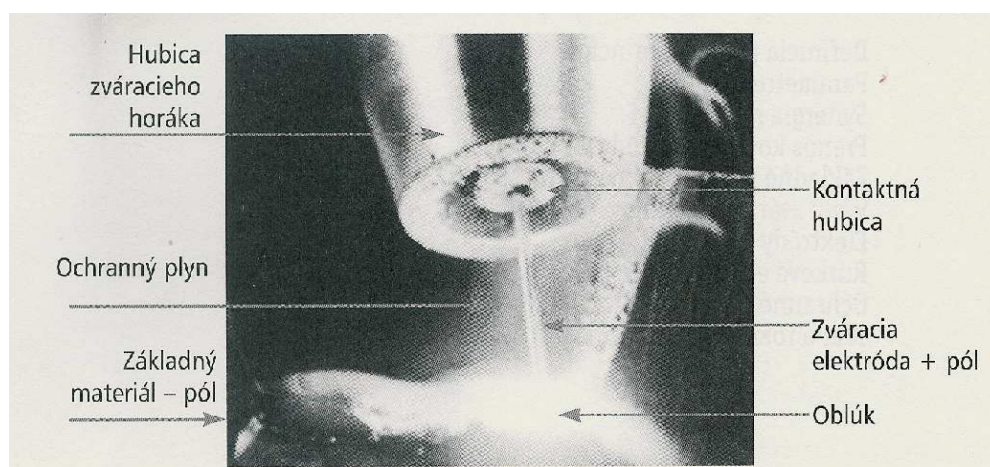
2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Charakteristika procesu svařování metodou MAG

2.1.1 Definice procesu, principy

Proces MAG sváření v ochraně plynu tavící se elektrodou je definován jako: svářecí proces, při kterém se vzájemné spojení materiálů tvoří teplem elektrického oblouku, který hoří mezi přídavným materiálem (tavící se elektrodou) a základním materiálem (Obr. 1 – [3]). Ochrana se dosahuje plynem nebo směsí plynů.

Proud I se přivádí do kontaktní hubice v hořáku, která je spojena s kladným pólem zdroje proudu. Nekonečná elektroda ve formě drátu se posouvá do svaru konstantní rychlostí mechanizovaným podávacím zařízením. Elektroda se v místě oblouku taví a kov se přenáší do svarové lázně. Ochranný plyn se přivádí do místa svaru hubicí, vytváří ochranu oblouku a roztavené svarové lázně, a tak chrání svar před nežádoucími účinky okolní atmosféry. MAG je technologie, která se hojně používá ve všech průmyslových odvětvích, od hromadné výroby různých součástí až po rozměrné svarky tlakových nádob a komponentů jaderné energetice. Také se používá při sváření různých tloušťek materiálu ve všech polohách. Dosahuje vysokou produktivitu a je velmi vhodná na automatizaci a robotizaci svářečských pracovišť.

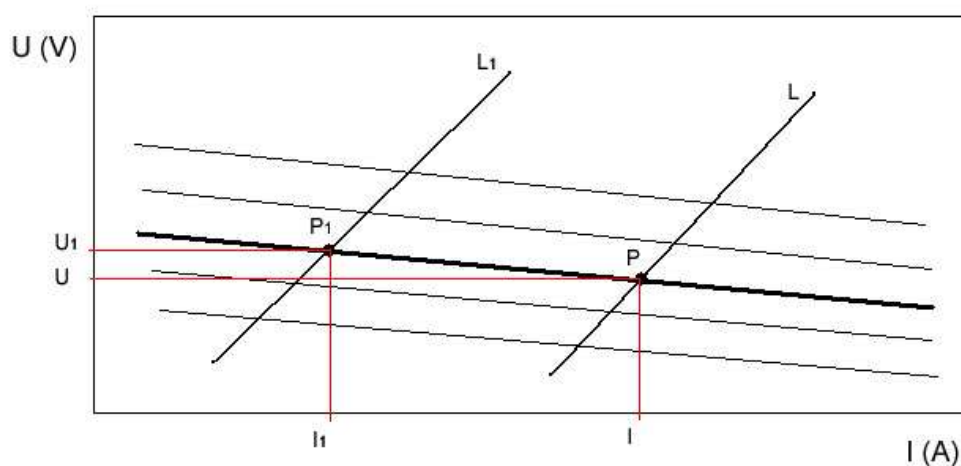


Obr. 1 Schéma sváření v ochraně plynu tavící se elektrodou

2.1.2 Svařovací zdroje

Zdroje svařovacího proudu jsou velmi důležitým prostředkem pro realizaci každé technologie svařování, která jako zdroj tepla pro tavení základního a přídatného materiálu využívá elektrický oblouk.

Základní požadavek na vlastnosti svářecího zdroje proudu je vhodná **statická volt-ampérová charakteristika**. Vyjadřuje závislost pracovního napětí od svářecího proudu při určitém nastavení regulačního zařízení zdroje. Každý zdroj s regulační zařízení má celý svazek takových charakteristik, které se dají nastavit pro konkrétní podmínky. Zdroj musí mít schopnost reagovat na změny vzdálenosti hubice od základního materiálu, tj. na změny napětí na oblouku. Ty nastávají v procesu poloautomatického i automatického sváření. Podmínka takové samoregulace je splněna při použití takového zdroje proudu, při kterém napětí na oblouku se vzrůstajícím proudem klesá jen málo, to znamená, že V-A charakteristika je plochá (s konstantním napětím), jak ji znázorňuje (Obr. 2).[3]



Obr. 2 Statické voltampérové charakteristiky oblouku L , L_1 , a různé V-A charakteristiky zdroje

Když si do průběhu V-A charakteristik zakreslíme charakteristiku oblouku 1 (Obr.2) v jejich průsečíku vznikne pracovní bod P . Tomuto pracovnímu bodu odpovídají hodnoty pracovního napětí U a pracovního proudu I , které

charakterizují podmínky sváření. Když se změnou podmínek zvýší např. délka oblouku, mění se statická charakteristika oblouku ($L > L_1$) a pracovní bod se přesune z polohy P do polohy P₁. Sníží se svářecí proud zároveň se snížením rychlosti odtavování elektrody.

Dynamická charakteristika zachycuje přechodové hodnoty napětí a proudu při rychlých změnách během svařování např. při zkratu, přerušení zkratu a znovu zapálení oblouku. Průběh této charakteristiky ovlivňuje kvalitu hoření oblouku, kresbu housenky a velikost rozstříku.

Požadavkům přesného nastavení svařovacích parametrů a jejich stability během vlastního svařování při vysokém výkonu, dynamických vlastnostech a vysoké účinnosti vyhovují invertorové svařovací zdroje (invertor – měnič kmitočtu). Tyto zdroje umožňují nastavení, řízení i monitorování libovolného svařovacího režimu např. umožňují bezzkratový pulzní režim s vysokou intenzitou oblouku a přitom měnitelným tavným výkonem, přizpůsobitelným pro všechny polohy svařování a tloušťky plechů. Při jakékoliv okamžité proudové změně v oblouku vyvolá řídicí jednotka regulační zásah v řízeném usměrňovači. Touto dynamickou rychlostí regulace je určena kvalita svařovacích vlastností zdroje.

2.1.3 Svařovací dráty

Kvalitu svarového kovu při daných parametrech sváření a zvolené ochraně plynu především určuje kvalita svářecí elektrody. Na dosažení požadovaných mechanických vlastností svářecího kovu je rozhodující její chemické složení a obsah nečistot. Směrné chemické složení elektrody, od které se odvíjejí její různé varianty, vychází z nutnosti dostatečné dezoxidace svarového kovu. Dezoxidace zabraňuje vzniku pórů účinkem CO a vyššího obsahu Mn a Si v elektrodě pomáhají překonat jejich ztráty, které vznikají účinkem oxidační atmosféry ochranného plynu. [4]

Pro svařování MAG se používají dráty průměrem 0,8 až 1,6 mm. Povrch drátu musí být čistý, hladký, nezvlhčený, bez mastnoty a koroze. Dráty se vyrábí poměděné pravidelnou a celistvou vrstvou mědi po celé délce drátu nebo hladké, nepoměděné. Navinutý drát v cívkách musí být z jednoho kusu,

v nepřepletených řadách, tak aby nedošlo k zauzlení, uvolnění a nebo k rozvinutí.

Vyrábí se dva základní typy: plný a trubičkový, plněný tavidlem nebo kovovým práškem.

2.1.4 Ochranné plyny

Ochranný plyn chrání roztavený konec elektrody, tekuté kapky kovu, tavnou lázeň a přilehlou oblast od kontaminace okolní atmosféry. Používané ochranné plyny se liší chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Proto volba ochranného plynu výrazně ovlivňuje stabilitu oblouku, způsob přenosu kovu přes oblouk a vytvoření svarové housenky, ale i všechny metalurgické reakce v oblouku, kapce, tekutém kovu a mezi tekutém kovu a struskou.

První pokusy chránit wolframovou elektrod před oxidací héliem a argonem se uskutečnily už v roce 1920. Při sváření tavící se elektrodou se použila ochrana argonem pro sváření hliníku v roce 1948. Přidání 5% kyslíku do Ar brzy umožnilo svářet tavící se elektrodou v základní poloze i uhlíkové ocele s dobrou nárazovou prací svarového kovu. Dnes známe široký sortiment plynů a jejich směsí, které se skládají z Ar, CO₂, O₂, He a dalších plynů. [3]

Nejčastěji používané plyny, resp. jejich směsi:

CO₂

Ar + CO₂ (až do 25% CO₂)

Ar + CO₂ (až do 3% CO)

Ar + O₂ (až do 8% O₂)

Ar + O₂ + CO₂ (až do 15% CO₂, 5% O₂)

65% Ar + 26,5% He + 8% CO₂ + 0,05% O₂

Ar + 8% CO₂ + 0,03 NO

Nejvíce se používá Ar a CO₂. Oba dva plyny mají vysokou atomovou hmotnost a důsledkem toho i vysokou hustotu. V poměru ke vzduchu ke vzduchu je 1,38 u Ar a 1,44 u CO₂. Hustota plynu se však mění s teplotou, proto i účinnost ochrany, v jednotlivých oblastech oblouku může být různá.

2.2 Svařovací parametry a podmínky

Správná volba parametrů a podmínek svařování je podmínkou vytvoření kvalitního spoje.

Za optimální považujeme takové parametry svařování, při nichž získáme svary s předepsanou kvalitou, při vysoké efektivitě a produktivitě práce.

Svářecími parametry se charakterizuje průběh sváření hlavními předepsanými veličinami procesu. Jsou to **svářecí proud I_s** , **svářecí napětí U_s** , a **rychlost svařování v_s** .

Svářecími podmínkami se charakterizuje celkový soupis dalších veličin postupu svařování při zabezpečování procesu.

Kvalitní, celistvý a mechanickými hodnotami plnohodnotný svarový spoj je potřeba zabezpečit volbou správných parametrů a podmínek sváření v celém jejich rozsahu. V průběh sváření se má zabezpečit proces nejmenšími výkyvy nastavených hodnot a stabilní tepelný příkon. Produktivita sváření hraje ve většině případů důležitou úlohu. Jsou však časté případy, kde jsou prvořadě kvalitativní požadavky.

Nastavení nejvhodnějších veličin na svářecím automatu přísluší obsluhujícímu pracovníkovi. Musí mu být znám vliv jednotlivých veličin a jejich vzájemné ovlivnění.

Mezi nejdůležitější nastavované parametry patří svářecí proud I_s , svářecí napětí U_s , a rychlost svařování v_s . Pomocí těchto veličin se dá výpočtem vyjádřit jedna z důležitých podmínek svařování, tzv. měrné vnesené teplo na jednotku délky svaru. Umožňuje už dopředu poznat rozsah tepelného ovlivnění. Výběrem správných hodnot a jejich nastavením se zabezpečí soulad elektrických veličin s rychlostí sváření, pro řešení častých metalurgických problémů sváření. Zabezpečí se požadovaná výsledná kvalita, celistvost a mechanické vlastnosti svarových spojů.

Měrné teplo Q je matematické vyjádření vztahu proudu, napětí a rychlosti svařování. Umožňuje variabilně stanovit už na začátku hodnoty těchto hlavních veličin s cílem dosáhnout ve výsledku podmínku požadovaného měrného tepelného příkonu. [4]

2.2.1 Svářecí proud

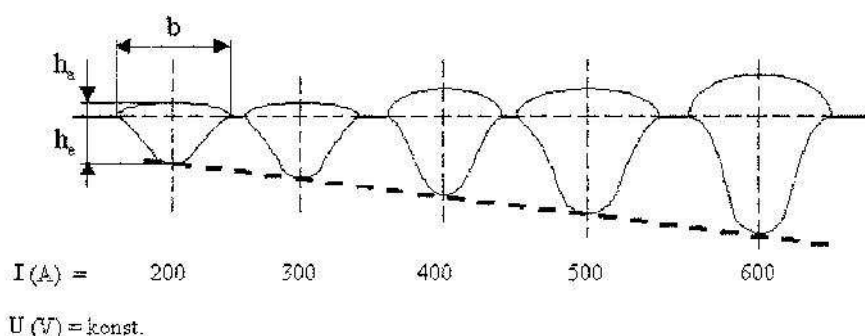
Svářecí proud má na tvar průřezu housenky, jak při sváření tak i navařování největší vliv.

Zvýšením proudu roste proudová hustota, velikost svarové koupele, součinitel tavení a odtavovací výkon.

Při konstantním napětí na oblouku (*Obr. 3*) nastává při zvětšování svářecího proudu intenzivní nárůst hloubky závaru **h_e** s mírným nárůstem převýšení **h_a** a malým vzrůstem šířky housenky **b**. Šířku housenky ovlivňuje především napětí a velikost rychlosti svařování.

Při nadměrném zvětšení svářecího proudu vzroste rozstřík a nebezpečí protavení svářené tloušťky. Výchozí svářecí proud se se zřetelem na tvar a rozměry spoje volí často zkušebně. Pro nejvhodnější průvar dané tloušťky se svářecí proud postupně zvyšuje.

Svářecí proud je veličina, která je v současných svářecích zařízení závislá na rychlosti posuvu drátu daného průměru. Podle nastavení rychlosti posuvu drátu si drát odebírá ze zdroje také množství proudu, které je potřebné pro jeho odtavení.



Obr. 3 Vliv proudu I na rozměry svarové housenky [5]

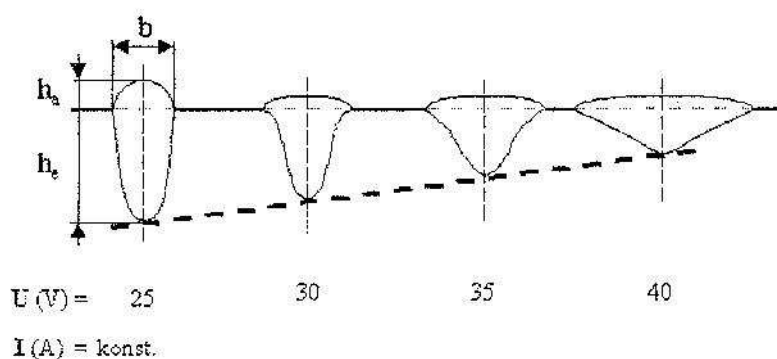
h_e – hloubka závaru, **h_a** – převýšení, **b** – šířka housenky

2.2.2 Svářecí napětí

Napětí na oblouku představuje rozdíl potenciálu mezi koncem drátu a povrchem svarové koupele. Je závislé na velikosti proudu, která vymezuje oblast pracovního napětí, ve které je oblouk stabilní a mění se podle délky oblouku. Na odtavovací výkon má napětí jen malý vliv. Ovlivňuje především šířku housenky (Obr. 4).

Nadměrné zvýšení napětí může být příčinou vzniku propalu. Čas styku kapky s prostředím oblouku se tím prodlužuje. Důsledkem toho jsou chemické reakce, které ovlivňují složení svarového kovu, a tím změny mechanických vlastností spoje. Při zvýšeném nárůstu napětí jsou svary náchylné na pórovitost. Také zvýšené napětí provází zvýšený rozstřík. Velikost svarové lázně může být příčinou předbíhání tekutého kovu před oblouk, vznikají tak těžkosti při sváření v polohách. [4]

Nízké napětí bývá příčinou nestabilního procesu, úzkých housenek s velkým převýšením, při vysokých rychlostech sváření. V těchto případech vzniká nedokonalé natavení na okrajích housenky. Při tvoření sousedních housenek se v těchto místech nachází nejvíce svarových chyb.



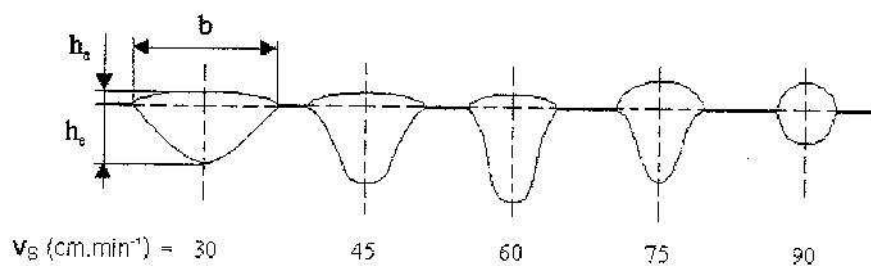
Obr. 4 Vliv napětí U na rozměry svarové housenky [5]

h_e – hloubka závaru, h_a – převýšení, b – šířka housenky

2.2.3 Rychlost sváření

Rychlost sváření je důležitá veličina, která se nepřímo směřně na množství tepla odevzdaného na jednotku délky svaru. Často se na ni bere ohled ve snaze zproduktivnit proces sváření. Správné hodnoty nastavení jsou závislé na ostatních parametrech a podmínkách se zřetelem na ohřev a ochlazování svařovaných tloušťek. Čím je rychlost sváření větší, tím rychleji se odevzdává teplo před oblouk, a tím menší je teplo potřebné pro předehřev svarových ploch. Zvětšením rychlosti sváření roste rychlost ochlazování základního materiálu po svařování.

U ocelí vyšších mechanických vlastností se po překročení kritické rychlosti ochlazování objevují chyby celistvosti. U běžných ocelí se rychlost sváření pohybuje v rozmezí přibližně od 10 do 60 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$. Při mechanizovaném sváření se dosahuje rychlosti až 120 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$. Účinek rychlosti sváření se projevuje na tvaru kráteru v roztavené lázni a tím na tvaru a rozměru průřezu svaru. Rychlostí sváření se ovlivňuje proud plynu potřebného na ochranu místa svaru a jeho okolí.

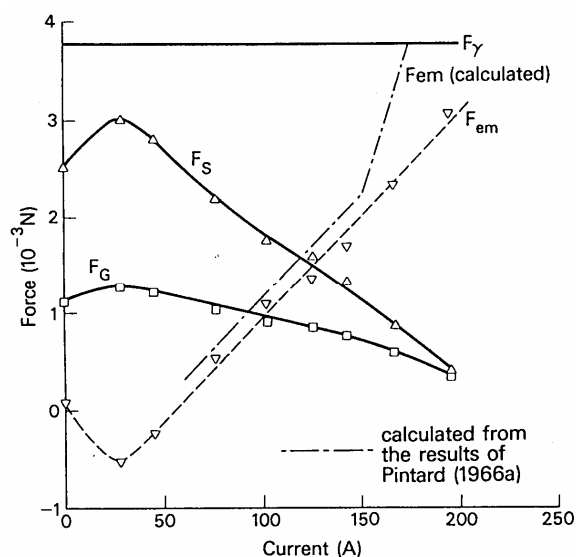


Obr. 5 Vliv rychlosti v_s na rozměry svarové housenky

h_e – hloubka závaru, h_a – převýšení, b – šířka housenky

2.3 Teorie tavení drátu

Podle nejpoužívanější teorie statické rovnováhy [6] závisí způsob tavení drátu a přenosu kovu na výslednici čtyř hlavních sil, jejichž poměr se mění s intenzitou proudu dle (Obr. 6).



Obr. 6 Síly působící na přenos kovu do svarové lázně [6]

Pro kapku v okamžiku odtržení platí: $F_\gamma = F_G + F_S + F_{em}$ (1)

Síla povrchového napětí kapky F_γ je největší silou, jedinou, která drží kapku pohromadě:

$$F_\gamma = 2\pi r \cdot \gamma, \quad (2)$$

kde r je poloměr elektrody.

Gravitace působí opačným směrem, ale pouze v základní poloze :

$$F_G = 4/3\pi \cdot R^3 \cdot \rho_d \cdot g, \quad (3)$$

kde ρ_d je hustota kapky, R poloměr kapky a g grav. konst.

Aerodynamický tah plynu (tah toku plasmy), může být odhadnut s uvažováním tažné síly na kulovou plochu vnořenou v kapalině stálé rychlosti pole:

$$F_S = C_D \cdot A_p \cdot (\rho_f \cdot v_f^2 / 2), \quad (4)$$

kde C_D je tažný koeficient, A_p je projekční plocha na ploše rovnoběžně s tokem kapaliny, ρ_f je hustota kapaliny, v_f je rychlost plynu.

Elektromagnetická síla F_{em} je výsledkem konvergence nebo divergence toku proudu uvnitř elektrody. Když přímkový tok proudu diverguje v kapce, Lorenzova síla, která působí v pravém úhlu na linii toku proudu vytváří odtrhující síly. Elmg. síla je dána Lorenzovým zákonem: $F_{em} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$, kde \mathbf{J} je hustota proudu a \mathbf{B} je magnetický tok. Za předpokladu, že hustota proudu na kapce je rovnoměrná, celkovou elmg. sílu na kapku dostaneme integrací vztahu přes proud, vedený na povrchu kapky .

$$F_{em} = f_2 \cdot \mu_0 \cdot I^2 / 4\pi, \quad (5)$$

kde μ_0 je permeabilita ve vakuu a f_2 koef. geometrie.

Když je vodivá zóna malá tak, že linie proudu konvergují, f_2 se stává negativní to znamená, že elmg. síla působí jako repulsivní síla. Nicméně když vodivá zóna je dostatečně velká, tak že linie proudu divergují, f_2 se stává pozitivní a elmg. síla se stává odtrhující silou.

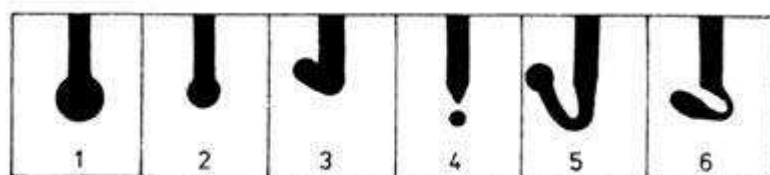
Drát se odtavuje v závislosti na velikosti proudu (Obr.7) nejprve ve velkých kapkách, přidržovaných na konci elektrody povrchovým napětím. Součet ostatních sil je nízký, a tak jejich růst je u metody MAG omezen zkratováním do tavné lázně, aby vzniklý rozstřík nepřesáhl přijatelnou úroveň. S rostoucím proudem se vlivem elektromagnetické síly na hrotu elektrody tavenina zužuje a se zmenšující se kapkou klesá i podíl gravitační a smykové síly.

Při vyšším proudu elektromagnetická síla prudce narůstá a za podmínky min. 75% podílu Ar v ochranném plynu při dosažení určité intenzity proudu převáží soudržnou sílu povrchového napětí a charakter přenosu kovu se změní

na sprchový. Invertorovými zdroji lze odtavování drátu přímo řídit v nízkoproudé oblasti řízením frekvence krátkých pulsů do oblasti sprchy.

S dalším růstem intenzity proudu se za dodržení specifických stabilizujících podmínek proud taveniny na konci drátu zužuje do tenkého proudu vysoké tepelné i kinetické intenzity, který se působením elektromagnetického pole axiálně odtrhává v celých sloupcích a žene taveninu do hloubky – moderovaná sprcha nebo rychle rotuje a vytváří širokou tavnou lázeň. [1]

Modus zkratového přenosu lze využít i ve vysokoproudé oblasti. Zkrácením oblouku a větším vysunutím (výletem) drátu z kontaktní špičky se zvětší průchozí elektrický odpor, který přispívá k tavení na jeho konci a při vyšším proudu působí zrychlené zkratování.



Obr. 7 Způsoby přenosu kovu [8]

1. kapkový přenos při nižších proudových hustotách
2. kapkový přenos při vyšších proudových hustotách s menšími kapkami a s vyšší frekvencí oddělování kapek
3. jako 1., ale zde je patrný vliv tlaku par oblouku, který vzniká při svařování v CO_2
4. sprchový přenos
5. přenos se silným vlivem protitlaku, možnost většího rozstříku
6. sprchový přenos s rotující kapkou.

2.4 Intenzita svařování MAG

Zvýšení intenzity tavení při svařování je nejúčinnějším prostředkem nejen ke zvýšení jeho produktivity, ale také k minimalizaci jeho negativních důsledků.

2.4.1 Základní podmínky intenzity svařování MAG

Od metody MAG samozřejmě nemůžeme čekat tak výrazné zvýšení hloubky závaru jako u metod s vysokou koncentrací energie (např. elektronový paprsek dosahuje poměru d/w až $1/60$), nicméně jak nám naznačuje např. geometrické řešení efektivity koutového svaru i malé zvýšení efektivity se znatelně projeví ve snížení potřebné plochy návaru, vnášející do spoje negativní vlivy. Bez možnosti zvýšení intenzity, kterou nám poskytuje současné svařování MAG by navrhované řešení neposkytovalo žádné výhody proti klasickému (normalizovanému) tvaru koutového svaru. Článek [9] názorně ukazuje, že všechny způsoby mělkého natavení povrchu materiálu a objemového vyplňování úkosu nebo koutu jsou neúčinné a vedou k nízké produktivitě, vysokému vnitřnímu pnutí nebo deformaci a většímu výskytu vad.

Základní podmínkou vysoké intenzity je vždy vysokovýkonné automatické jednovrstevné svařování (tahem bez rozkyvu). Synonymem vysokého výkonu a hlubokého závaru je proud, přesněji jeho intenzita na jednotce průřezové plochy elektrody v místě katodové (anodové) skvrny. V porovnání s technologií svařování netavicí se elektrodou (WIG), která může tavit přímo základní materiál bez tavení drátu, ale má nízkou tepelnou účinnost a stejně i životnost zaostřeného hrotu, na němž intenzita závisí a dále na rozdíl od svařování pod tavidlem, které má zase výhodu v lepší ochraně tavné lázně a celého přenosu kovu, ale je postaveno na nízké rychlosti tavení drátu s větším průměrem, metoda MAG je postavena na rychlém tavení tenkého drátu. Způsob jeho tavení je určen soustavou zdroj – plyn – drát, která je předmětem intenzivního výzkumu, jenž nabízí praxi stále nové možnosti.

Proti uvedeným starším technologiím klade kombinace tavené elektrody a plyné ochrany vyšší nároky na optimální seřízení, na druhou stranu nabízí mnohem větší možnosti ve způsobu tavení drátu i svarové lázně. Intenzita tavení, působící velikost a hloubku závaru MAG, je výsledkem interakce mnoha fyzikálních procesů, v nichž proud sice hraje hlavní roli, ale víceméně zde spolupůsobí všechny již uvedené podmínky a procesní parametry. Prvním předpokladem vysoké intenzity je co největší účinnost přenosu tepla. [7]

2.4.2 Intenzita zkratového přenosu kovu

Počítačová simulace dynamiky zkratového přenosu kovu provedená CHOI a spol. prokázala, že pro proud až do cca 200A je řídicí silou přenosu kovu gravitace a kapilární tlak vlivem povrchového napětí kapky i lázně. Teprve při proudu cca 300 A je patrné výraznější stlačení okolí zúženého můstku a podstatné zkrácení času zkratového cyklu vlivem narůstajícího vlivu elektromagnetické síly. S klesajícím objemem kapky se rovněž zkratový cyklus zkracuje. S rostoucí frekvencí zkratů (dynamikou procesu) roste tlakový impuls, ženoucí lázeň do hloubky. [7]

Z uvedené simulace vyplývá, že při zkratovém procesu elektromagnetická síla má rozhodující vliv na impuls proudění ve svarové lázni směrem do hloubky, ale až při proudu nad 200 A, a až v konečné fázi zaškrvení můstku.

Tento závěr byl prakticky potvrzen vynálezem STT přenosu kovu (Surface Tension Transfer), který využívá zdokonaleného invertoru s obvodem, schopným reagovat v nanosekundách na vzrůst intenzity proudu při zaškrvení kapky a včas snížit proud před rozpadem můstku, čímž podstatně zredukuje rozstřík. Odstřihnutím fáze, kdy elektromagnetická síla dává největší impuls proudění taveniny v lázni směrem dolů a zároveň vyvolá reaktivní rozstřík zbytku můstku mimo oblast svaru se jako vedlejšího účinku dosáhlo snížení hloubky závaru, takže tento způsob nachází uplatnění více pro svařování v kořeni svaru a pro navařování.

Hermans, který prováděl detailní monitorování zkratového procesu, včetně vyhodnocení zkratových frekvencí dále zjistil, že jeho dynamika závisí též na synchronizaci frekvence zkratů s frekvencí kmitání lázně, ke které dochází až při extrémních parametrech, maximální frekvenci zkratů a rychlosti drátu, těsně před celkovou destabilizací procesu. Pro každou kombinaci parametrů lze nalézt jen jedno takové maximum.

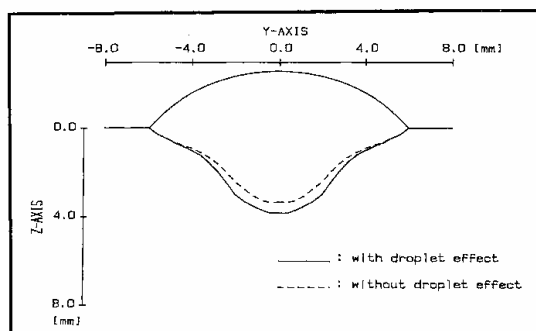
V oblasti zkratového přenosu by mělo existovat pro daný soubor vstupních podmínek jedno optimální nastavení parametrů, kdy dochází k synchronizaci frekvence zkratů s frekvencí kmitání tavné lázně, ke které dochází až při extrémních parametrech, maximální frekvenci zkratů a rychlosti drátu, těsně před celkovou destabilizací procesu. [7]

2.4.3 Intenzita sprchového přenosu kovu

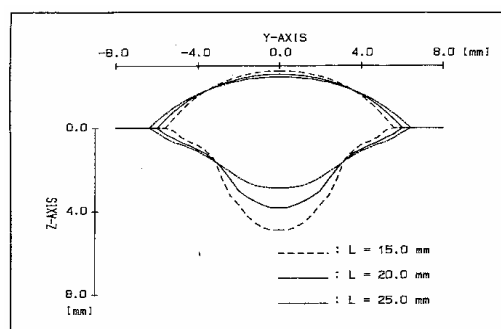
Působení nárazu proudu kapek do svarové lázně je považováno za hlavní příčinu vzniku prstového závaru u metody MAG. Čím intenzivnější je proud, tím jsou kapky směřovány hlouběji do lázně jako výsledek posloupnosti nárazů.

Ohring a Lugt provedli pohyblivou 3D simulaci tokových a teplotních polí MAG svarové lázně pomocí metody konečných diferencí, kde je patrný téměř kolmý sloupec nárazového proudu, vytvářející prstový závar a kolem něj jsou dva víry – menší dopředu ve směru pohybu a prodloužený dozadu.

Kim a spol. [7] provedli 3D kvazi-stabilní analýzu tepelného a kapalinového toku pro pohyblivý tepelný zdroj MAG, ve kterém jsou zkoumány řídicí síly pro proudění ve svarové lázni - elmag. síla, vztahová síla a povrchové napětí a též vliv proudu kapek z tavené elektrody. Je diskutován vztah vzdálenosti špičky (CTWD) k délce oblouku pro analýzu vlivu CTWD na formování lázně. Byly provedeny série srovnávacích experimentů ke sledování rozdílu geometrie svaru vlivem změn CTWD (15, 20, 25 mm). Experimenty byly provedeny pro rychlost drátu 9 m/min, rychlost svařování 42 cm/min a napětí 31,5 V, což při použití plynu 80/20 a drátu 1,2 mm jsou velmi typické parametry automatického svařování. Proudění tavné lázně je uvažováno jako laminární a nestlačitelné. Povrch lázně byl uvažován deformovatelný. Vliv sloupce kapek je patrný z (Obr. 8), kde se srovnává simulace jen s uvažováním prvních tří sil a se započtením vlivu sloupce kapek. Na (Obr. 9) je sumarizován vliv vzdálenosti kontaktní špičky na tvar (šířku a převýšení) svaru a hloubku závaru.



Obr. 8 Vliv sloupce kapek na svarovou lázeň



Obr. 9 Vliv špičky na tvar a hloubku závaru

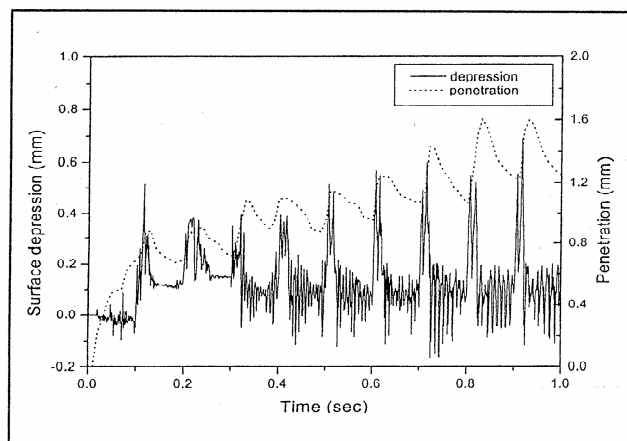
Stlačení povrchu lázně vysokoproudým obloukem studoval Choo a spol.. Odvodili, že obvykle používané rozdělení tepla a hustoty proudu podle

Gaussovy křivky se nedá aplikovat obecně na silně deformované povrchy svarové lázně, pozorované experimentálně při vysoké intenzitě oblouku, které neodpovídaly součtu momentů magnetického a obloukového tlaku. Z toho vyplývá, že zde musí působit ještě jiná síla stejného řádu.

Smykové napětí plynu ve srovnání s Marangoniho prouděním zkoumali Choo a Szekely. Vliv smyku plynu (též definovaný jako aerodynamický tlak plynu) na proudění, tedy jeho moment působící na svarovou lázeň, je ve srovnání s Marangoniho prouděním často považován za zanedbatelný vlivem nízké hodnoty viskozity argonu vzhledem k tekutému kovu. Při vyšším proudu v oblasti převažujícího vlivu elektromagnetické síly však způsobuje hluboký závar a také se předpokládá, že může být odpovědný za nestability povrchu jako vlny a obruby.

Povrchové napětí je míra přilnavosti mezi dvěma atomy na povrchu. Když teplota roste, přilnavost klesá a gradient $\delta\gamma/\delta T$ je záporný. Střed svarové lázně je teplejší než okraj, takže ze středu na okraj se vytváří proudění. Za přítomnosti povrchově aktivních látek, jako je síra nebo kyslík tyto vazby atomů vlivem segregace mohou zesílit při rostoucí teplotě a gradient se změní na kladný. Vliv pulzujícího stlačení povrchu tlakem oblouku na proudění v lázni a formování svaru na (Obr. 10) demonstruje dynamiku růstu hloubky závaru. Vlivem proudového impulsu se rychle stlačí lázeň a vzroste závar. Zatímco stlačení klesne ihned po skončení pulsu, závar klesá pomalu. To platí jen pro menší tavné lázně, ve větší lázni se axiální moment, vyvozený stlačením lázně a přenos tepla ke dnu zpožďuje a jeho vliv na hloubku závaru se tím snižuje.

[7]

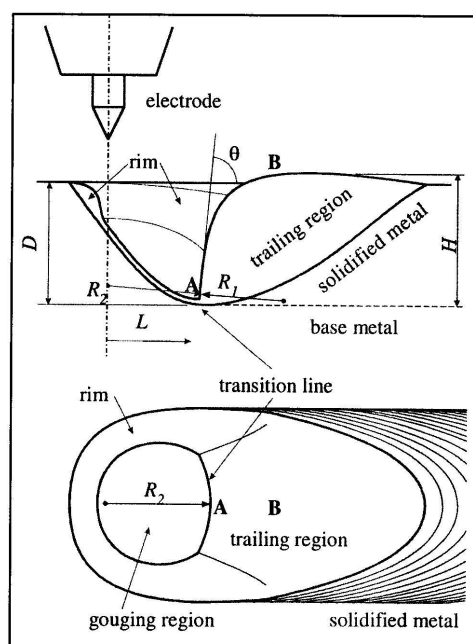


Obr. 10 Vliv tlaku oblouku na proudění v tavné lázni

2.4.4 Intenzita vysokoproudého oblouku

Bylo zjištěno, že pro nízké proudy pod 200A se stlačení svarové lázně vypočtené jen za uvažování momentů magnetického a obloukového tlaku dobře shoduje s měřením, zatímco pro vyšší proudové hodnoty jejich součet nedá dohromady experimentálně zjištěné hluboké stlačení a závar. Z toho vyplývá, že při vysokém proudu nabývá některá z ostatních sil stejného řádu jako povrchové napětí a elektromagnetické síly a touto silou bylo identifikováno smykové napětí plynu.

Při vyšším proudu dochází vlivem tlaku oblouku ke stlačení nebo oscilaci povrchu lázně a tím mění i směr působení smyku plynu. Mendez a Eagar zjistili, že při svařování vysokým proudem a rychlostí se působením tlaku oblouku vytvoří ve svarové lázni prohlubeň (drážka) (Obr. 11), která se spolupůsobením hlavně smykového tahu plasmy plynu prohloubí tak, že vytlačí taveninu na okraj prohlubně a pod obloukem zůstane jen velmi tenká vrstvička taveniny s efektivním přenosem tepla oblouku přímo do materiálu, což způsobí velmi hluboký závar. Tavenina je vytlačována nahoru k okraji prohlubně, kde tvoří obrubu, prostřednictvím které tavenina proudí oběma směry do zadní (vlečné) části svarové lázně, kde postupně tuhne. Tento mechanismus byl popsán pro svařování WIG, ale experimentálně byl námi potvrzen i pro metodu MAG. [7]



Obr. 11 Tvorba drážky tlakem oblouku

2.5 Efektivita provedení koutového svaru metodou MAG

Pojem efektivita zavádíme z důvodu, že tuto efektivitu chceme měřit a optimalizovat, a tak potřebujeme definovat pozitivní stav, vymezený pouze na technologickou oblast, vycházející již z dané konstrukce a určitého materiálu. Definice efektivit pak bude např.: Provedení svaru určité nosnosti při minimální spotřebě přídavného materiálu, případně vneseného měrného tepla. [9]

$$E = E_z \cdot E_n, \quad (6)$$

kde E je celková efektivita, E_z je efektivita závaru E_n je efektivita návaru.

Efektivita závaru E_z je poměr maximální hloubky závaru z a teoretické nosné velikosti v_t odpovídající skutečné ploše návaru, pokud by byla celá efektivně využita (bez převýšení). Efektivita závaru je při konstantní hodnotě teoretické nosné velikosti svaru přímo úměrná velikosti závaru. Nejvyšší hodnota efektivit závaru se dosáhne, když velikost závaru je rovna teoretické nosné velikosti svaru.

$$E_z = \frac{z}{v_t}, \quad (7)$$

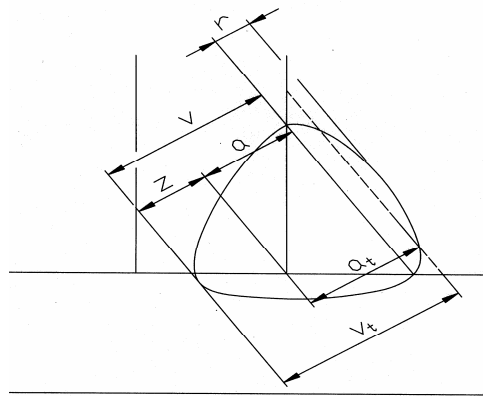
kde E_z je efektivita závaru, z je hloubka závaru a v_t je teoretická nosná velikost svaru.

Efektivita návaru E_n vyjadřuje vliv převýšení svaru (r). Je poměrem výšky svaru a k teoretické výšce svaru a_t odpovídající skutečné ploše návaru, pokud by byla efektivně využita (bez převýšení).

Při nulovém převýšení je tato efektivita rovna jedné.

$$E_n = \frac{a}{a_t}, \quad (8)$$

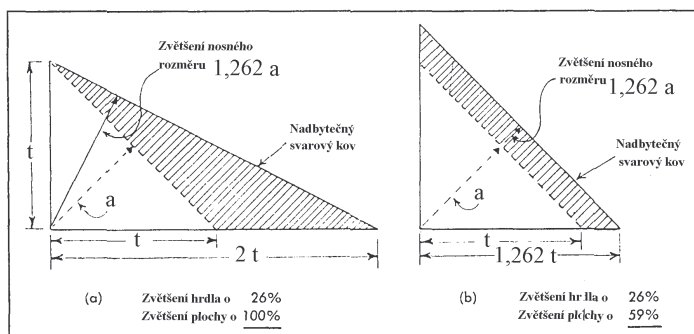
kde E_n je efektivita návaru, a je výška svaru a a_t je teoretická výška svaru.



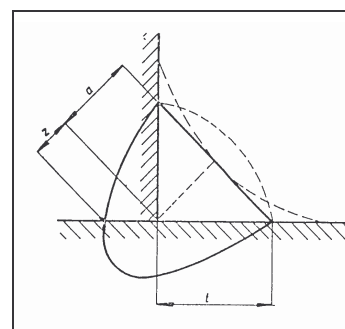
Obr. 12 Rozměry koutového svaru

2.5.1 Efektivita z konstrukčního hlediska

U kolmých (T) spojů se téměř výhradně používá koutového svaru, který se tímto stává nejpoužívanějším typem svarového spoje. Koutový svar není konstrukčně ideálním řešením spoje dvou kolmých dílů, naopak má mnoho nevýhod. Právě u něj je nebezpečí předimenzování vznikající v průběhu realizace svaru nejvyšší. Na rozdíl od tupého svaru, zde není velikost svaru omezena geometrií svarových ploch. Velikost koutového svaru závisí jen na správném odhadu parametrů svařování. Plocha svaru je kvadrátem výšky takže např. rozdíl jediného milimetru mezi svarem nosné velikosti 4 a 5 mm (bez uvažování závaru), znamená zvýšení spotřeby přídatného materiálu přibližně o 56 %. Též nevhodné polohování, při kterém dojde ke stečení lázně (Obr. 13) neefektivně zvýší plochu svaru. [9]



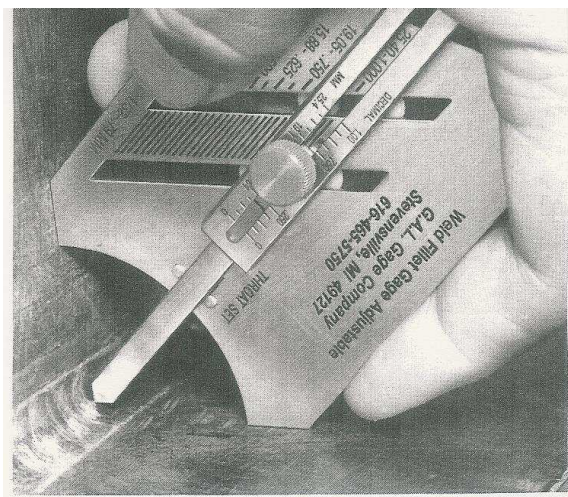
Obr. 13 Overwelding [9]



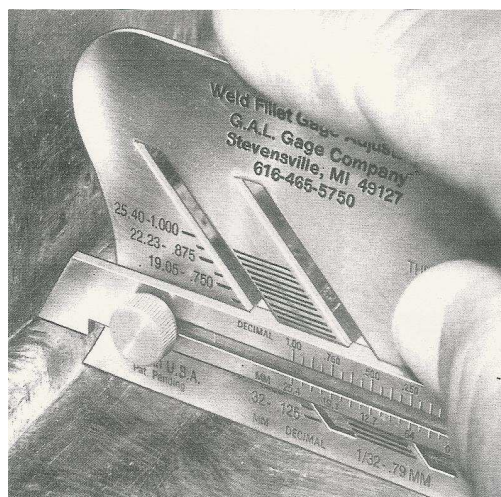
Obr. 14 Nosný průřez

Na koutovém svaru je pozoruhodné nejen to, že se snadno může předimenzovat, ale také naopak - má skrytou velkou rezervu opačným směrem. Zvýšení hloubky závaru a jeho zahrnutí do nosné velikosti svaru představuje

velmi účinný způsob minimalizace vnějších rozměrů svaru a tím i spotřeby přídavného materiálu. Již stávající předpisy pro výpočty svarových spojů umožňují paušálně započítat hloubku závaru do nosné velikosti koutového svaru u poloautomatických a automatických způsobů svařování. Např. ČSN 050120 již ve znění z roku 1970 , dále pak ČSN 731401 ve znění z roku 1998 podmiňuje započtení závaru do účinné výšky koutového svaru dokumentací a prokázáním jeho soustavného dodržování. Přitom se však stále vychází z vnější geometrie svaru ve tvaru rovnoramenného trojúhelníka podle (Obr. 14), který je vhodný pouze pro poloautomatické svařování a kontrolu mechanickou měrkou (Obr. 15).



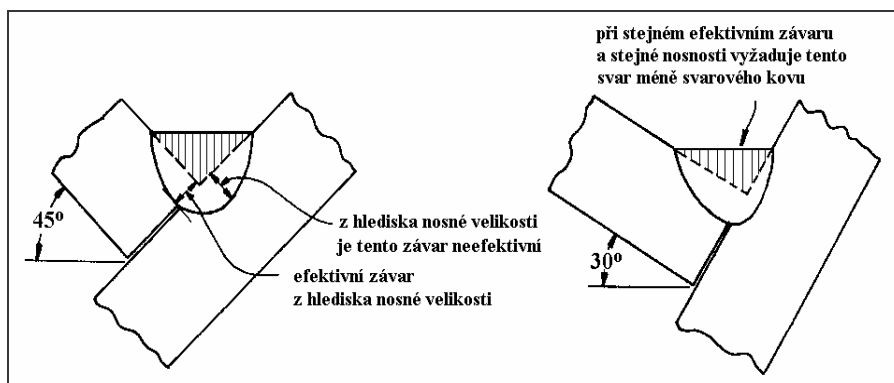
Obr. 15 Mechanická měrka pro rovnoramenný svar



Obr. 16 Mechanická měrka pro nerovnoramenný svar

Při automatickém svařování lze však vnější tvar svaru vhodným polohováním a vhodnou volbou parametrů svařování s výhodou změnit tak, abychom dosáhli většího podílu závaru na jeho nosné velikosti. Na tuto skutečnost upozorňuje již BLODGETT [10]. Vysvětlení jeho přístupu je na (Obr.17) . Maximální závar má směřovat do mezery, stejně jako u tupého spoje a tomu odpovídá i vnější tvar svaru. Otázkou kontroly velikosti svaru se zde nemusíme zabývat, lze snadno spočítat z předepsaných parametrů a záleží jen na udržení míry převýšení, která je touto volbou též dána. Navíc již existují měrky i pro tento nerovnoramenný typ svaru (Obr.16).

Norma ČSN EN ISO 6520-1 platná od roku 2000 již definuje překročení velikosti koutového svaru jako vadu č. 5214 a norma ČSN EN 25817 definuje velikost koutového svaru jako „výšku největšího rovnoramenného trojúhelníka, vepsaného do příčného řezu svaru“. Koutový svar s viditelným podkročením rozměru nemusí být posuzován jako vada, jestliže je požadovaný rozměr dosažen dostatečně hlubokým závarem. [1]



Obr. 17 Vhodné polohování svaru

2.5.2 Efektivita z technologického hlediska

Spočívá v tepelné efektivitě procesu MAG a efektivitě vytváření závaru. Obloukové svařování je intenzivním lokálním ohřevem materiálu, při kterém jen určitá část energie je přímo využita na jeho tavení. [1]

Celková tepelná efektivita (podíl energie zdroje, využitý k tavení) je součtem efektivit oblouku a efektivit tavení a dá se vyjádřit pro tavenou elektrodu rovnicí:

$$\eta = 1 - ((1-n) \cdot q_p + m \cdot q_w) / (U \cdot I), \quad (9)$$

kde

q_p - teplo vyzářené a odvedené obloukem,

q_w - podíl tepla absorbovaný materiálem,

n - část energie vyzářené a odvedené ze sloupce oblouku a přenesené do materiálu,

m - část energie odvedené materiálem pryč.

2.5.2.1 Efektivita (účinnost) přenosu tepla u procesu MAG

Při obloukovém svařování je jen určitá část zdrojem dodávané energie přímo využita k tavení materiálu.

Celková tepelná efektivita = efektivita oblouku + efektivita tavení

2.5.2.2 Efektivita přenosu tepla obloukem η_a

Energie, vytvářená obloukem a elektrodou je vnesena do svaru s určitou intenzitou a účinností. Intenzita proudu závisí na rozdělení hustoty proudu oblouku na povrchu materiálu. Účinnost přenosu se v rámci jedné obloukové technologie s vyšší proudu výrazně nemění a pro technologii MAG, charakterizovanou tavenou elektrodou a prostředím - směsí inertního a aktivního plynu, je η_a v rozsahu 0,84 +- 0,04. Zbytek se ztrácí radiací a vedením do plynného okolí.

2.5.2.3 Efektivita tavení materiálu η_m při přenosu tepla vedením

Energie, dodaná svaru, se dále dělí na dvě části – hlavní je použita pro tavení svarové lázně a její podíl je efektivitou tavení η_m . Zbytek je rozptýlen v okolním základním materiálu zejména vedením tepla a má podíl na formaci tepelně ovlivněné zóny materiálu (TOZ) a předeřevu. Efektivita tavení je dána zejména fyzikálními vlastnostmi materiálu, na nichž závisí způsob vytváření tavné lázně, jejímž prostřednictvím se teplo přenáší formou vedení a proudění. Na rozdíl od proudění je vedení tepla teoreticky probádanou záležitostí.

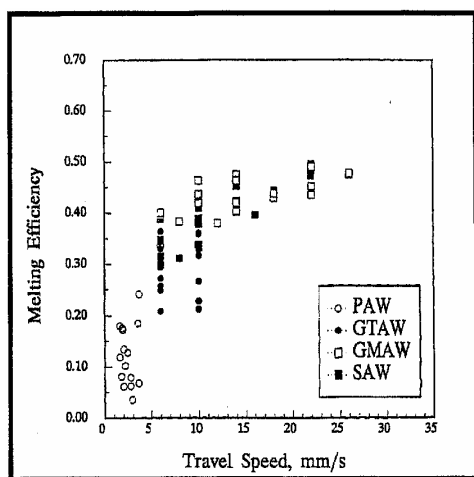
Wells ukázal, že efektivita tavení závisí na bezrozměrném poměru $\alpha / v \cdot d$, kde α je teplotní vodivost zákl. mat., v je rychlost svařování a d je šířka svaru a navrhl rovnice pro efektivitu tavení pro 2D a 3D tepelný tok. Tyto vztahy určují počáteční vysoký nárůst efektivit tavení s rychlostí svařování a nasycení η_m na hodnotě 0,48 pro 2D (0,37 pro 3D) podmínky tepelného toku při vysokých svařovacích rychlostech, kdy poměr teplotní vodivosti k rychlosti svařování je nízký, což bylo pozorováno experimentálně. [1]

$$\eta_m = \frac{1}{\frac{8 \cdot \alpha}{5 \cdot v \cdot d} + 2} \quad \text{pro 2D (10)}, \quad \eta_m = \frac{1}{1,35 \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{10,4 \cdot \alpha^2}{(v \cdot d)^2}} \right)} \quad \text{pro 3D odvod tepla (11)}$$

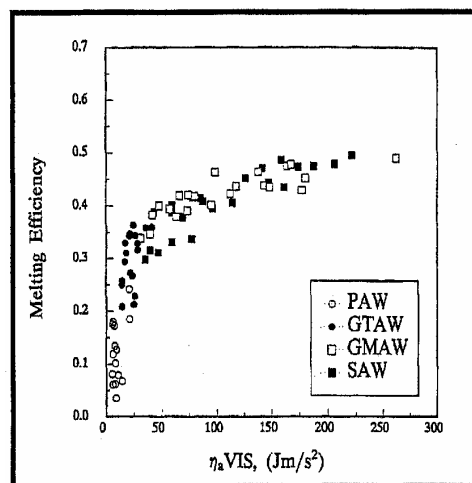
(Obr. 18) ukazuje efektivitu tavení jako funkci rychlosti svařování. Jistá tendence je zde patrná ale velký rozptýl hodnot naznačuje, že tento faktor není sám o sobě rozhodující. Graf na (Obr.19), kde je efektivita tavení funkcí násobku dodaného tepelného výkonu ($\eta_a U I$) a rychlosti (v) ukazuje mnohem prokazatelnější závislost a dokládá, že efektivita tavení je dána synergickým působením výkonu a rychlosti svařování bez ohledu na druh procesu.

Efektivita tavení jako poměr tepla použitého k tavení k celkovému teple vnesenému do svarku představuje poměr mezi okamžitým výkonem ($\eta_a U I$) dodaným místně do svarku zdrojem, pohybujícím se rychlostí (v) a přeneseným teplem pryč ze svaru teplotním vedením (α). Jestliže se zvyšuje výkon lokálního ohřevu může se zdroj tepla pohybovat při tavení svaru rychleji, a tak snižuje čas dostupný pro přenos energie tepelným vedením ven ze svaru. Více energie se spotřebuje pro tavení a tím roste jeho efektivita.

Prvotní matematická řešení 2D a 3D kvazi-statického rozdělení tepla s uvažováním pouze vedení tepla jsou i základem komerčních simulačních programů a dávají užitečné výpočty teplotních profilů, určujících jak ideální tvar svarové lázně, tak zejména šířku a strukturu TOO a napětově-deformační poměry v okolí svaru. Tvar lázně a zejména skutečnou hloubku závaru neřeší.



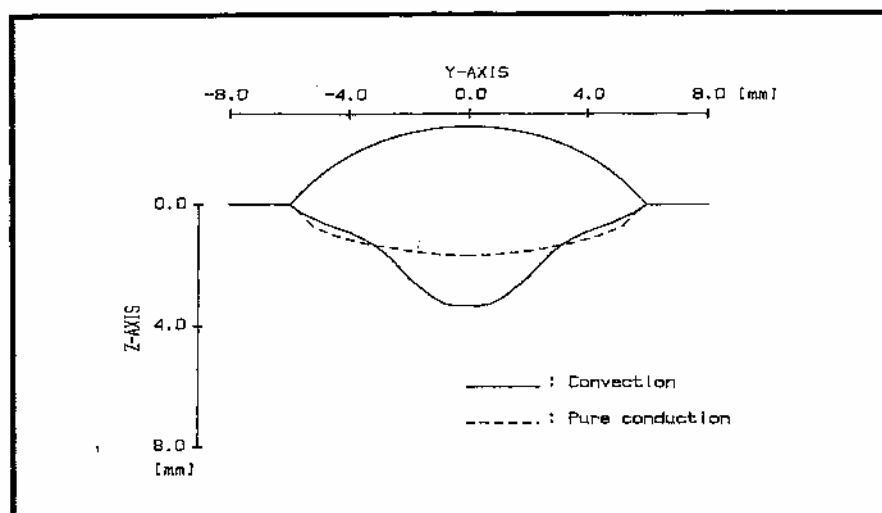
Obr. 18 Efekt. tavení jako funkce rychlosti



Obr. 19 Efektivita tavení jako funkce násobku dodaného tepelného výkonu

2.5.2.4 Efektivita tavení materiálu η_m při přenosu tepla prouděním

Přenos tepla ve svarové lázni prouděním výrazně zvyšuje účinnost přenosu tepla (efektivitu tavení) a pro určení výsledné geometrie svaru má velký význam. [1]



Obr. 20 Srovnání proudění a vedení tepla v tavné lázni

Na (Obr. 20) je srovnání simulace tvaru svarové lázně s uvažováním jen **vedení** a zahrnutím vlivu **proudění** (plná čára), které demonstruje jakou roli hraje proudění při přenosu tepla, zejména při vytváření “prstového” tvaru závazu vlivem dostředného proudění svarové lázně, přenášející teplo ke kořenu svaru mnohem efektivněji než vedením.

Limmaneevichitr a Kou experimentálně zkoumali vliv zdroje a vlastností materiálu na **Marangoniho proudění** (termokapilární) vlivem povrchového napětí, které působí radiálně ve směru gradientu teploty. Převahující směr a sílu proudění zkoumali s použitím působení proměnlivě zaostřeného paprsku laseru na dvě látky s velmi rozdílným Prandtlovým a Pecletovým číslem:

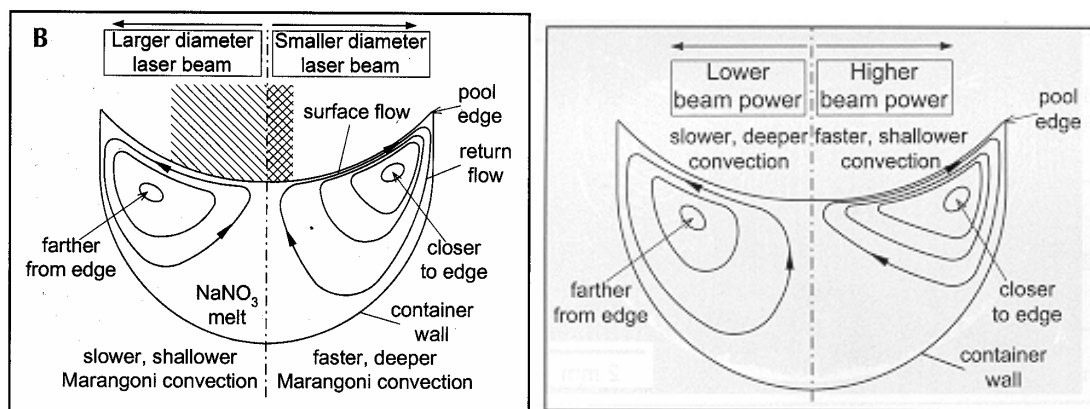
$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (12) ,$$

$$Pe = \frac{L \cdot V}{\alpha}, \quad (13)$$

kde C_p je specifické teplo, μ dynamická viskozita a k tepelná vodivost, L je poloměr povrchu lázně, V je max. povrchová rychlost proudění a α je teplotní vodivost.

Zjistili, že zejména **Pecletovo číslo**, analogicky vyjádřené již ve Wellsových rovnicích, vyjadřuje nejlépe poměr přenosu tepla prouděním a vedením a je nejlepším ukazatelem vlivu proudění na tvar svarové lázně. Čím je vyšší, tím dominantnější je vliv Marangoniho proudění. Rozdíl teplot svarové lázně uprostřed a na okraji vytváří rozdíl intenzity povrchového napětí v jejímž směru tavenina proudí na povrchu lázně až dosáhne okraje, kde se stáčí směrem dolů. Tak vzniká široký závar s plochým, někdy až konvexním dnem.

Když je **Pe** mnohem větší než 1, je přenos tepla v lázni primárně řízen prouděním a vedení tepla je zanedbatelné. Naopak, když je **Pe** mnohem menší než 1 např. u kovů s vysokou tepelnou vodivostí při nízkých rychlostech u malých svarů převažuje vliv vedení.



Obr. 21, 22 Vliv paprsku oblouku na rychlost proudění

Čím je paprsek užší a má vyšší intenzitu, tím je Marangoniho proudění rychlejší. Větší je rychlost proudění na povrchu než rychlost zpětného proudění, takže střed víru je blíže povrchu a okraje (Obr. 21, 22). Zvýšení výkonu snižuje hloubku proudění, zatímco zúžení paprsku ji zvyšuje, protože zvyšuje moment zpětného proudění.

Nejdůležitějšími povrchově aktivními látkami při svařování jsou kyslík a síra. I když s teplotou povrchové napětí čistého kovu klesá, vlivem obsahu kyslíku (síry) povrchové napětí svarové lázně s teplotou stoupá, což způsobuje již popsaný efekt obrácení směru Marangoniho proudění. Většina čistých kovů má záporný teplotní gradient povrchového napětí (dy/dT) a z toho plynoucí odstředný směr Marangoniho proudění.

Výzkum svařování MAG v padesátých letech prokázal, že malé množství kyslíku v argonu (2 – 5 %) nemá patrný vliv na charakteristiku oblouku, ale výrazně zlepšuje zejména tvorbu oxidů a tím elektronovou emisi a stabilitu katodové skvrny, smáčivost povrchu a mimo to též mění směr proudění taveniny v lázni. Příměs aktivní složky do argonu (O_2 nebo CO_2) je vedle dynamické charakteristiky zdroje druhou základní podmínkou použitelnosti tohoto procesu pro svařování oceli.

Aspekty produktivity a efektivity se při svařování vysokým výkonem a rychlostí setkávají – efektivní přenos tepla a tedy minimální vnesené měrné teplo na potřebnou velikost svaru se dosáhne při vysokém měrném tavném výkonu, což znamená vysoký proud, způsobující maximální hloubku závaru a při vysoké rychlosti svařování, která je synonymem vysoké produktivity. Parametry, které vedou k optimalizaci efektivity tavení redukuje velikost TOZ, minimalizují ztráty energie a snižují napětí a deformaci. Optimalizací svařovacích parametrů tak můžeme levněji dosáhnout výhod procesů s vysokou koncentrací energie. Koutový svar je ideálním příkladem toto demonstrovat.

Efektivitu tavení oceli vzhledem ke složitým poměrům při proudění taveniny ve svarové lázni nelze zatím teoreticky odvodit ze vstupních podmínek procesu ale je možno ji odvodit z průřezové plochy hotového svaru. To platí i pro ostatní kritéria efektivity procesu. [1]

2.5.3 Efektivita závaru (EZ)

Synonymem vysokého výkonu a hlubokého závaru MAG svařování je **proud**, přesněji jeho hustota na špičce drátu v místě katodové (anodové) skvrny. V porovnání s technologií svařování netavící se elektrodou (WIG), která může tavit přímo základní materiál bez tavení drátu je metoda MAG postavena na rychlém tavení tenkého drátu. U zdroje s plochou statickou charakteristikou a obrácené polaritě oblouk taví především drát a jeho rychlost tavení určuje hodnotu proudu.

2.5.3.1 Vliv proudu I, rychlosti drátu V_d, tavného výkonu P na EZ

Proud I (A) je základní procesní proměnnou při obloukovém svařování. V procesu MAG na intenzitě proudu závisí nejen tavný výkon a hloubka závaru, ale také způsob (modus) přenosu kovu mezi elektrodou a plynem chráněnou tavnou lázní. Hodnotu proudu nelze předem nastavit, protože prochází až po zapálení oblouku a tehdy je možné jej teprve seřídit nastavením rychlosti drátu.

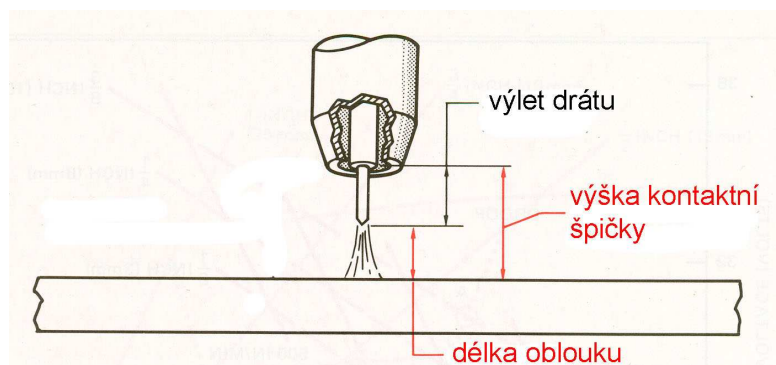
Tavný výkon (P) závisí na anodovém poklesu napětí U_a a odporu konce drátu $R(\Omega)$, kterým je proud veden od kontaktní špičky po anodovou skvrnu – výlet drátu L (mm). Tavný výkon generovaný celkovým poklesem potenciálu je určen vztahem (7), kde ρ je měrný odpor drátu a D jeho průměr.

$$P = I \cdot (U_a + I \cdot R) = I \cdot U_a + I^2 \cdot \rho \cdot L / D^2 \quad (14)$$

Z toho vyplývá, že při daném výkonu zdroje délka volného konce drátu (výlet) zvyšuje podíl tavení drátu na úkor tavení materiálu obloukem, takže při rostoucí ploše svaru klesá podíl závaru a tím i efektivita provedení svaru.

Skutečnost, že při svařování MAG svařovací proud taví především přídavný materiál zdánlivě limituje možnosti jeho využití ke zintenzívnění procesu, protože plocha závaru více-méně odpovídá velikosti návaru. To však platí jen bez uvažování již zmíněného vlivu rychlosti svařování. [1]

2.5.3.2 Vliv výletu drátu, délky oblouku, výšky kontaktní špičky na EZ



Obr. 23 Výlet drátu

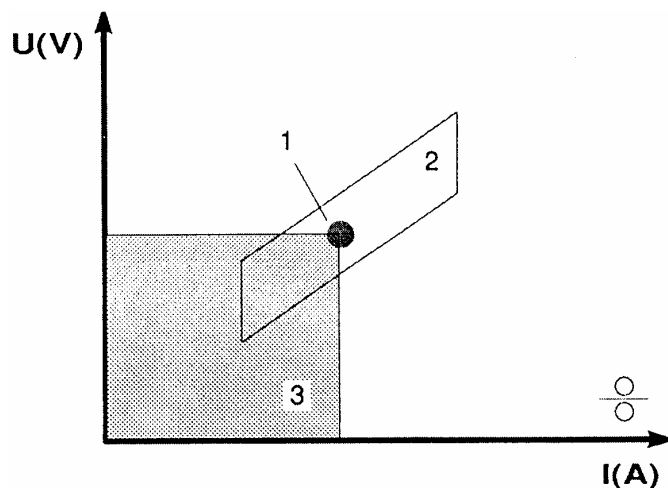
U MAG svařování je drát podáván do oblouku určitou rychlostí a jí odpovídá velikost proudu při daném sklonu ploché charakteristiky zdroje. Plochá charakteristika má samoregulační charakter, který kompenzuje rozdíly **délky oblouku L_o** , během svařování automatickým podáváním zvýšeného nebo sníženého proudu k dosažení rovnováhy, to ale platí bezezbytku jen u vysoce vodivých materiálů. U ocelového drátu hraje důležitou roli odpor ve výletu drátu. Na rozdíl od ručně vedeného (poloautomatického) svařování MAG, při automatickém svařování máme pevně danou **výšku kontaktní špičky nad povrchem L_c** . Tato vzdálenost se skládá z **délky oblouku L_o** a **výletu drátu L** (*Obr. 23*). Změnou výšky špičky nebo rychlostí drátu můžeme výlet drátu i délku oblouku měnit. Při zvyšování rychlosti drátu, zvětšujeme výlet drátu na úkor délky oblouku. Zvětšením výšky kontaktní špičky L_c se zvyšuje délka oblouku a proud se snižuje vlivem zvýšeného odporu v obvodu v daném okamžiku tak, jak to plochá charakteristika vyžaduje. Tím se sníží tavný výkon.

Délka oblouku L_o určuje rozdělení proudu a tlaku na povrchu svarové lázně a tedy i její velikost a tvar. Příliš krátký oblouk způsobuje zkrat elektrody se svarovou lázní, nižší tavení zákl. materiálu, vysoký a úzký návar, nerovnoměrné vnášení tepla a větší možnost výskytu vad. Naopak příliš dlouhý oblouk způsobuje plochý, mělký návar, dovoluje oblouku větší pohyb, zvyšuje rozstřík a může způsobit porositu turbulencí vzduchu. Délka oblouku je základní podmínkou existence procesu a ekvivalentem napětí.

2.5.4 Synergie

Pro snadnější nalezení pracovního bodu byly výzkumnými středisky firem vyrábějících zdroje, plyny nebo dráty pro svařování MAG vypracovány grafy pracovních oblastí pro určité kombinace vstupních podmínek (*Obr. 24*) a ty potom zapracovány do knihoven procesorů svařovacích zdrojů.

Těmito zdroji pak lze svařovat pomocí tzv. synergie, to znamená, že procesor na základě vybrané kombinace vstupních podmínek sám upravuje druhý parametr - napětí nebo rychlost drátu, podle zvoleného, svářečem nastavovaného parametru tak, aby proces byl pro zvolený tepelný výkon optimálně stabilní. [1]



Obr. 24 Oblast stability procesu

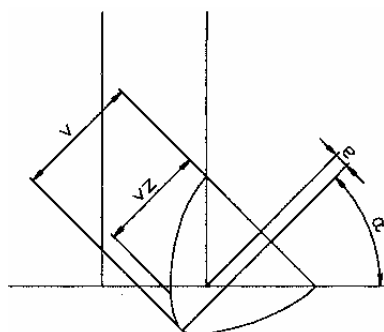
1 - pracovní bod, 2 – oblast stability hoření oblouku, 3 – výkon zdroje

2.5.5 Šumové faktory mající vliv na efektivitu svařování

Jedním z šumových faktorů je poměr dle normy započitatelné výšky v místě, kde závar protíná styk hrany stojny s pásnicí a skutečné maximální výšky v místě max. hloubky závaru (Obr.25).

$$N_1 = v_z / v \quad (15)$$

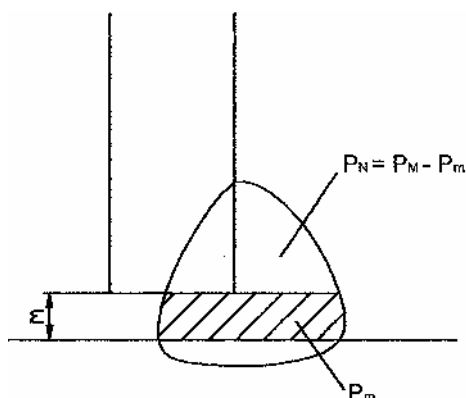
Tento faktor by měl zohlednit přesnost nasměrování závaru – tedy úhel svarku k rovině dráhy hořáku a excentricitu této roviny k ose svaru.



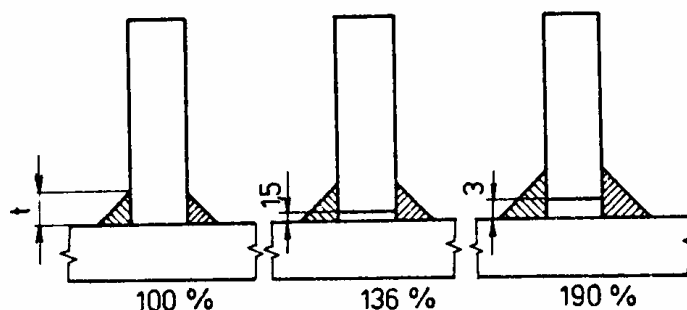
Obr.25 Excentricita

2.5.5.1 Vliv mezery v kořeni svaru

V praxi je nejdůležitějším šumovým faktorem přesnost sestavení, tedy mezera v kořeni svaru, což platí i pro tupý svar. Z literatury i praxe je na rozdíl od tupého svaru znám negativní vliv mezery v kořeni na efektivitu koutového svaru, viz. (Obr.26,27). To je dáno jeho stávající geometrií.



Obr.26 Vliv mezery na plochu návaru



Obr. 27 Vliv mezery na plochu návaru

2.5.6 Metodika měření efektivity koutového svaru

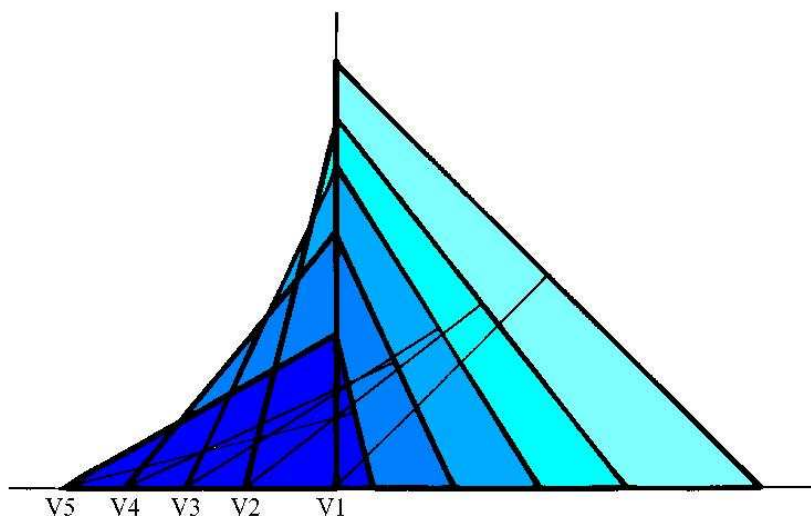
Měníme-li hloubku závaru při neměnné nosné velikosti svaru, mění se tvar rovnoramenného trojúhelníka průřezové plochy svaru tak, že se zpočátku pravoúhlý vrcholový úhel vrchol V1 na (Obr. 28) stále zmenšuje až ramena splynou v přímce doteku hrany stojny s pásnicí, což je ideální tvar svaru, teoreticky dosažitelný například elektronovým paprskem.

Technologie MAG dosáhne samozřejmě nižšího maximálního závaru (např. vrchol V4), lišícího se podle kombinace vstupních podmínek a intenzity procesu.

2.5.6.1 Matematické řešení závarem řízené geometrie svaru

Jak vyplývá z uvedených předpokladů, řídicí hodnotou pro velikost průřezové (návarové) plochy svaru P_s při konstantní hodnotě nosné velikosti svaru v_t je hloubka závaru z , tedy

$P_s = f(z)$, pro $v_t = \text{konst.}$



Obr. 28 Změna vnějšího tvaru koutového svaru při změně návaru

Pro umožnění statistického vyhodnocování efektivity koutových svarů byla vypracována metodika měření efektivity reálných koutových svarů, sestávající z měření skutečné geometrie reálného svaru, jehož makrostruktura je nejprve vyfocena digitální kamerou a snímek přenesený na PC je vyhodnocen pomocí programu NIS Elements 2.3 CZ. Nakonec jsou stanoveny jednoduché ukazatele efektivity které vztahují reálné geometrické hodnoty koutového svaru k ideálním, a také tzv. šumové faktory, které zahrnují vliv nepřesností a obtížně kontrolovatelných faktorů.

2.5.6.2 Stanovení faktorů efektivity provedení svaru

Základním (pozitivním) faktorem efektivity provedení koutového svaru je poměr maximální hloubky závaru a teoretické (ideální) nosné výšky, odpovídající skutečné

ploše návaru pokud by byla celá efektivně využita.

$$E_1 = z/v_t, \quad (16)$$

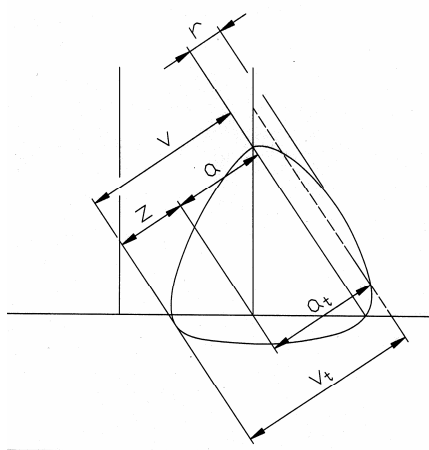
kde z je hloubka závaru a v_t je nosná velikost svaru.

Druhým (negativním) faktorem, zohledňujícím neefektivní převýšení svaru je poměr skutečně naměřené výšky návaru k teoreticky dosažitelné při plochém svaru. To získáme odečtením závaru od skutečné a od teoretické výšky svaru (Obr. 29). Tím eliminujeme vliv závaru na efektivitu a můžeme jej nazvat faktorem efektivity návaru.

$$E_2 = a/a_t = (v - z)/(v_t - z), \quad (17)$$

Kde a je výška svaru, a_t – teoretická výška svaru.

Celkovou efektivitu pak můžeme jednoduše vyjádřit součinem: $E = E_1 \cdot E_2$. Jedná se o bezrozměrné parametry s rozsahem (0,1), vhodné pro statistické zpracování.



Obr. 29 Popis měřených rozměrů svaru

2.6 Optimalizace procesu

2.6.1 Metoda centrální kompozice

Tato metoda nabízí proti uvedenému ortogonálnímu uspořádání, vhodnější sférické uspořádání parametrického prostoru.

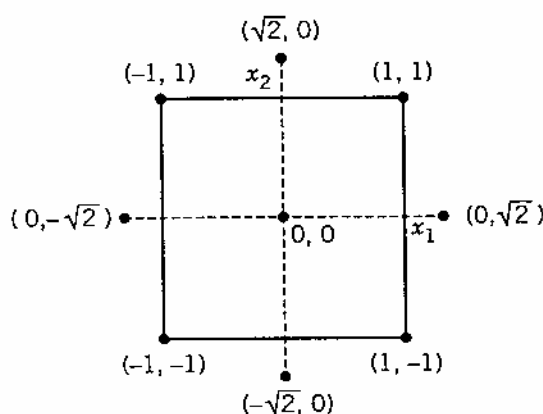
Návrhová matice experimentů podle středové kompozice sestává z:

Úplného 2^k faktoriálu na úrovni $-1, 1$ (k = počet řídicích proměnných)

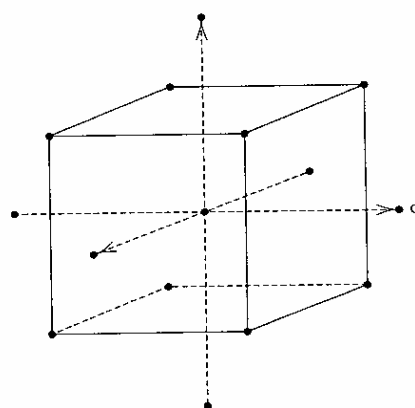
Osových bodů (mezní, 0) – celkem $2 \cdot k$ rovnic

Středových bodů (0,0) – doporučeno 3 až 7 rovnic

Body návrhu tak vymezí v parametrickém prostoru vícerozměrný sférický tvar: kruh pro 2 parametry (*Obr.30*), kouli pro 3 parametry (*Obr. 31*) doplněné o několik středových bodů, poskytujících odhad rozptylu. [11]



Obr. 30 Sférický tvar pro 2 parametry



Obr. 31 Sférický tvar pro 3 parametry

Používaná regresní rovnice druhého řádu jejíž obecný tvar je:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (18)$$

Regresní rovnice druhého řádu umožňuje modelovat zakřivení funkce, proto musí být řídicí proměnné sledovány nejméně ve třech, ale nejlépe na pěti úrovních a tak z hlediska přiměřeného počtu potřebných experimentů by měl být počet řídicích parametrů co nejnižší. Statistickým vyhodnocením záznamu

odezvvého pole se provede výpočet regresních koeficientů metodou nejmenších čtverců, úprava matematických modelů a jejich parciální derivace pro určení optima. Grafický výstup kontur odezvvého pole v závislosti na hlavních proměnných v původních jednotkách může sloužit jako operační okno pro nastavení procesu.

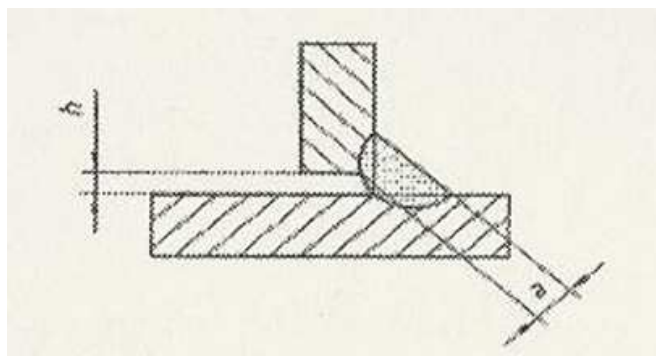
Předpokladem jejího použití je určitá znalost daného procesu, kdy dovedeme přibližně odhadnout působení jednotlivých faktorů na výstupní veličiny. Za tímto účelem nejprve provedeme tzv. screening, jehož výsledkem je vytipování oblasti blízko-optimálních podmínek, pro kterou pak s vymezeným souborem řídicích parametrů a jejich vymezeným rozsahem navrhne soubor experimentů podle středové kompozice.

2.7 Hodnocení vad a určování stupňů jakosti koutového svaru dle ČSN EN ISO 5817

U svarového spoje musí být obvykle odděleně hodnocen každý jednotlivý druh vady. Různé druhy vad vyskytující se v libovolném průřezu spoje, které zeslabují plochu průřezu, mohou vyžadovat zvláštní pozornost (*Obr. 41*). Mezní hodnoty vad pro vícenásobné vady jsou použitelné pouze v případech, kde nejsou překročeny požadavky na jednotlivou vadu. Jakékoliv dvě sousedící vady oddělené od sebe na vzdálenost, která je menší než hlavní rozměr menší vady, musí být posuzovány jako jednotlivá vada. [12]

2.7.1 Špatné sestavení koutových svarů

Mezery mezi spojovanými částmi přesahující příslušné mezní hodnoty mohou být v některých případech kompenzovány odpovídajícím zvětšením velikosti koutového svaru.



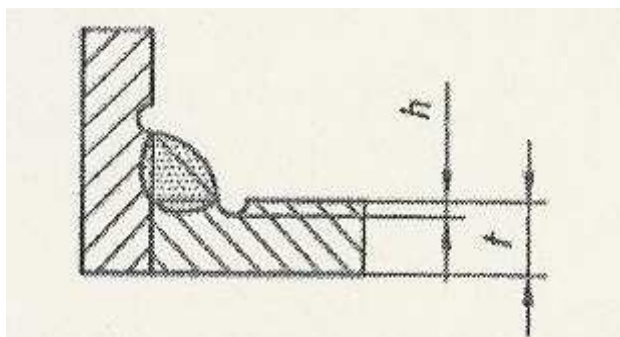
Obr.32 Špatné sestavení koutových svarů

Tab.1 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
0,5 až 3	$h \leq 0,5 + 0,1a$	$h \leq 0,3 + 0,1a$	$h \leq 0,2 + 0,1a$
> 3	$h \leq 1 + 0,3a$, max 4	$h \leq 0,5 + 0,2a$, max 3	$h \leq 0,5 + 0,1a$, max 2

2.7.2 Zápal

Je požadován plynulý přechod.

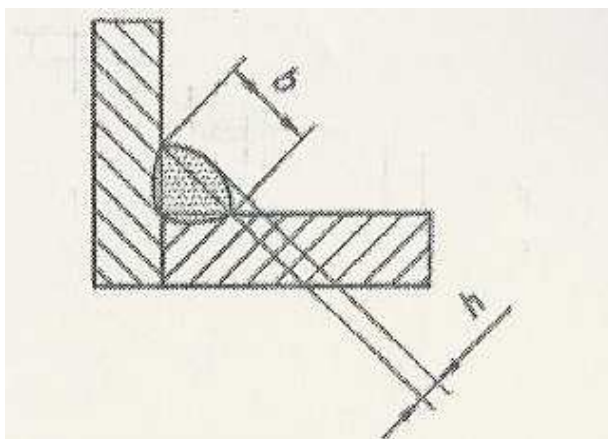


Obr. 33 Zápal

Tab. 2 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
0,5 až 3	$h \leq 0,2t$	$h \leq 0,1t$	nepřístupné
> 3	$h \leq 0,2t$, max 1	$h \leq 0,1t$, max 0,5	$h \leq 0,05t$, max 0,5

2.7.3 Nadměrné převýšení koutového svaru

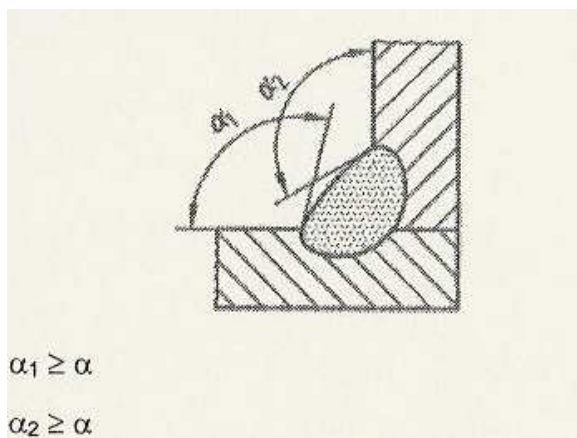


Obr. 34 Nadměrné převýšení koutového svaru

Tab.3 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
$\geq 0,5$	$h \leq 1 + 0,25b$, max 5	$h \leq 1 + 0,15b$, max 4	$h \leq 1 + 0,1b$, max 3

2.7.4 Strmý přechod svaru



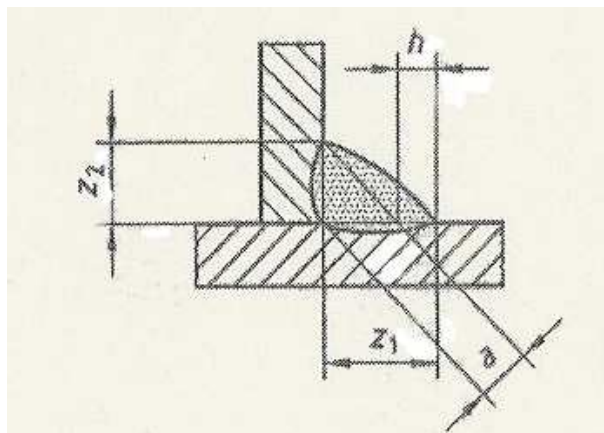
Obr. 35 Strmý přechod svaru

Tab.4 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
$\geq 0,5$	$\alpha \geq 90^\circ$	$\alpha \geq 110^\circ$	$\alpha \geq 110^\circ$

2.7.5 Nadměrná asymetrie koutového svaru

Jen v případech, kde nebyl předepsán symetrický koutový svar.



Obr. 36 Nadměrná asymetrie koutového svaru

Tab.5 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
$\geq 0,5$	$h \leq 2 + 0,2a$	$h \leq 2 + 0,15a$	$h \leq 1,5 + 0,15a$

2.7.6 Pórovitost kořene

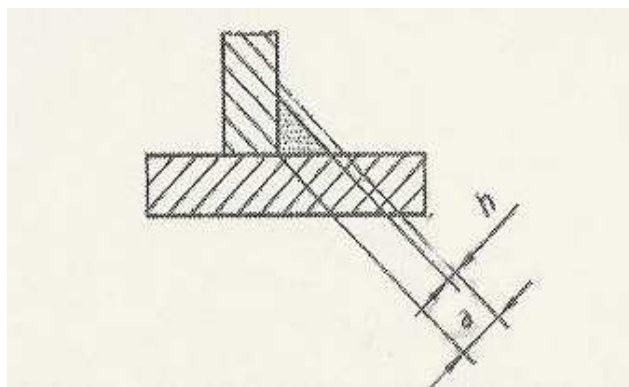
Porézní kořen svaru způsobený tvorbou bublin ve svarovém kovu během tuhnutí.

Tab.6 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
$\geq 0,5$	místně přístupné	nepřístupné	nepřístupné

2.7.7 Podkročení velikosti koutového svaru

Nepoužitelné u metod s prokázanou větší hloubkou průvaru.



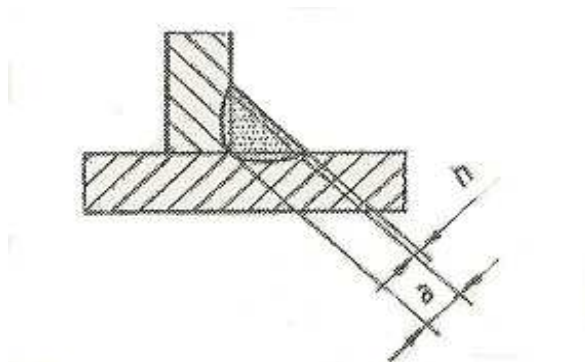
Obr. 37 Podkročení velikosti koutového svaru

Tab. 7 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
0,5 až 3	$h \leq 0,2 + 0,1a$	$H \leq 0,2$	nepřístupné
> 3	$h \leq 0,3 + 0,1a$, max 2	$h \leq 0,3 + 0,1a$, max 1	nepřístupné

2.7.8 Překročení velikosti koutového svaru

Kdy skutečná velikost koutového svaru je příliš velká.



Obr. 38 Překročení velikosti koutového svaru

Tab. 8 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
$\geq 0,5$	neomezeno	$h \leq 1 + 0,2a$, max 4	$h \leq 1 + 0,15a$, max 3

2.7.9 Trhlina

Všechny druhy trhlin, mimo mikrotrhlin a kráterových trhlin jsou pro všechny třídy jakosti nepřístupné.

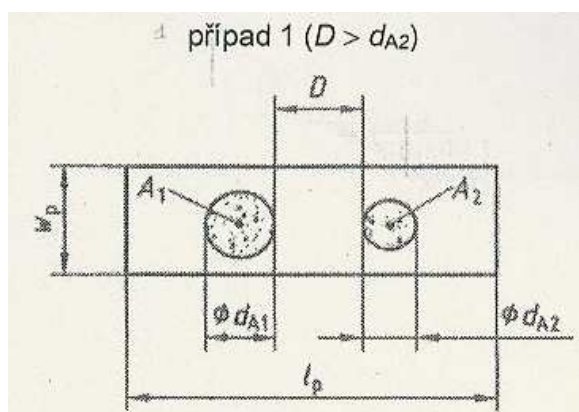
2.7.10 Pórovitost a shluky pórů

Maximální rozměr jednotlivého póru pro koutové svary určuje Tab. 9

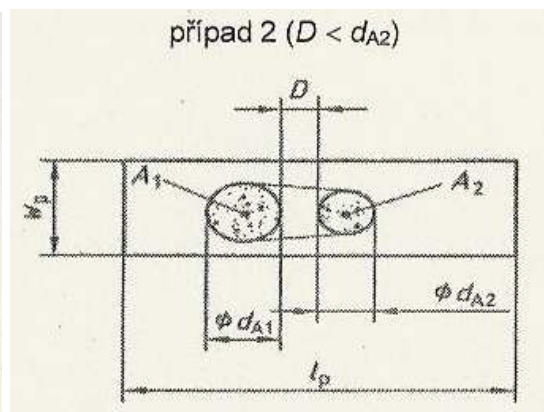
Tab. 9 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
$\geq 0,5$	$d \leq 0,4a$, max 5	$d \leq 0,3a$, max 4	$d \leq 0,2a$, max 3

Mezní stav pro shluky pórů určují 2 případy (Obr. 39, 40)



Obr. 39 Min. vzdálenost pórů



Obr. 40 Min. vzdálenost pórů

Případ 1:

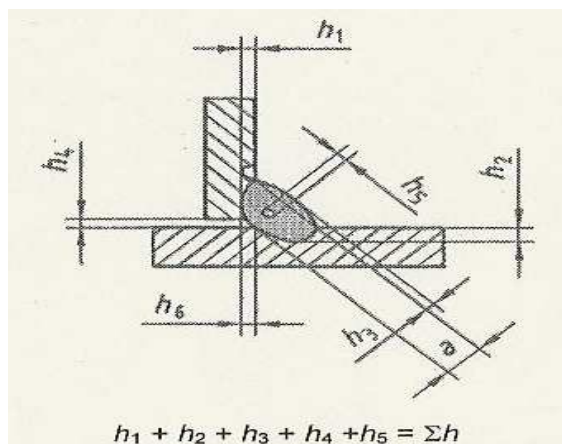
Součet různých ploch pórů ($A_1 + A_2 + \dots$) v porovnání vyhodnocované ploše $l_p \times W_p$

Případ 2:

Pokud je D menší než d_{A1} nebo d_{A2} , podle toho, která z hodnot je menší, musí být plocha určená obalovou křivkou obsahující plochy shluku pórů $A_1 + A_2$ považována za jednu plochu vad

2.7.11 Vícenásobné vady

Řez pro makrovýbrus by měl být v nejnepříznivější oblasti svarového spoje.



Obr. 41 Vícenásobné vady

Tab. 10 Mezních hodnot vad pro stupně jakosti

Tloušťka plechu (mm)	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti (mm)		
	D	C	B
0,5 až 3	nepřístupné	Nepřístupné	nepřístupné
> 3	$\Sigma h \leq 0,4t$ nebo $0,25a$	$\Sigma h \leq 0,3t$ nebo $0,2a$	$\Sigma h \leq 0,2t$ nebo $0,15a$

3.EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Cíl práce

Úkolem experimentální části diplomové práce bylo zjistit vliv mezery v kořeni koutového svaru na efektivitu provedení svaru metodou MAG. Dále pak optimalizovat proces svařování se započtením tohoto šumového faktoru. Výsledky by měly přiblížit měření efektivitu provedení svaru jehož výzkum probíhá na katedře KSP již několik let podmínkám praxe.

3.2 Pracoviště a použité zařízení

3.2.1 Laboratoř automatického svařování MAG



Obr. 42 Laboratoř automatického svařování MAG

3.2.1.1 Příslušenství

- zdroj Migatronik BDH 550 - invertorový zdroj s možností pulzního režimu a sinergického ovládání, max. proud 550 A, max. rychlost drátu 24 m/min.
- lineární pojezd firmy MIGATRONIC
- monitorovací zařízení WeldMonitor

3.2.1.2 Přídavný materiál

Drát plný, hlazený **ESAB OK Aristorod 12.50, Ø 1,2 mm**, nepoměděný svařovací drát nové generace je určený pro svařování většiny běžných nelegovaných konstrukčních ocelí především tam, kde jsou vyžadovány vysoké svařovací parametry a nejvyšší podávací rychlosti drátu, tj. na mechanizovaných a robotizovaných pracovištích.

Technické parametry

Chemické složení drátu	C 0,1%; Si 0,9%; Mn1,5%
Mez kluzu	470 MPa
Mez pevnosti	560 MPa
Tažnost	26%

3.2.1.3 Ochranný plyn

Třísložková směs ochranného plynu firmy **AIR PRODUCTS FERROMAXX PLUS 68% Ar, 12% CO₂, 20% He**

Tento plyn zlepšuje kvalitu svaru, omezuje riziko vzniku vad, zajišťuje hluboký průvar a není příliš citlivý na nastavení parametrů při svařování. Dovoluje vyšší produktivitu, snižuje rozstřík nataveného materiálu a zanechává hladký a plochý povrch svaru.

3.2.1.4 Parametry svařovaných vzorků

Ke svařování vzorků byla použita plochá tyč tl. 8 a 12mm x 100mm – 6m, rozřezána na vzorky o rozměru 100 x 250 mm.

Materiál**ČSN EN 10027 – S275JR (11 375.1)****Chemické složení**

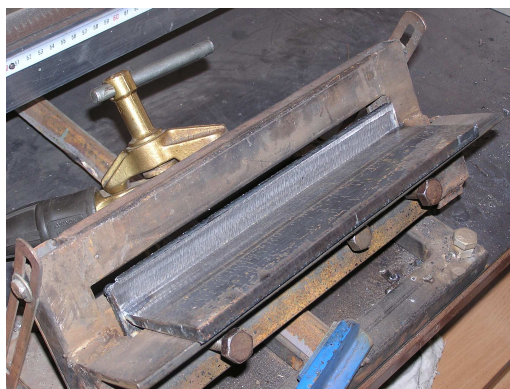
Obsah C	0,17 %
Obsah N	0,009 %
Obsah P	0,045 %
Obsah S	0,045 %

Mechanické vlastnosti

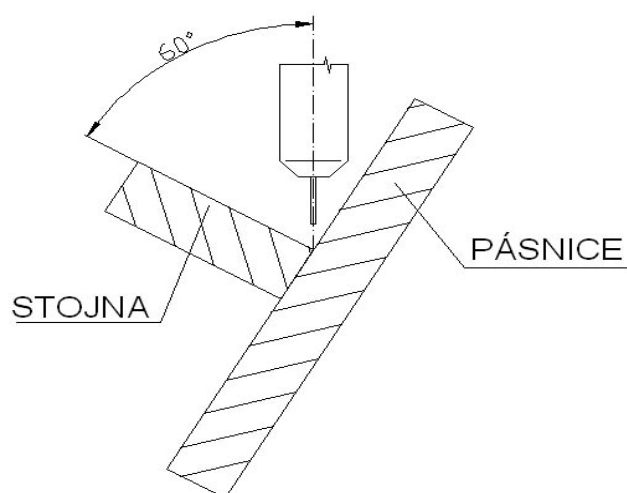
Mez kluzu	235 MPa
Mez pevnosti	340-470 MPa
Tažnost	27%
Modul pružnosti	206 GPa

3.2.1.5 Způsob svařování vzorků

Jednovrstevné automatické svařování MAG koutových svarů ocelových plechů v poloze PA do úžlabí tahem bez rozkyvu dle ČSN EN ISO 6947 s úhlem nastavení svarku 60° vůči stojně (Obr. 44). Úhel náklonu hořáku v rovině rovnoběžné se směrem svařování je 10° dopředu. Délka svaru je 240 mm, svar byl proveden letmým startem a letmým koncem. Průtok ochranného plynu byl konstantně nastaven na 18 l / min.



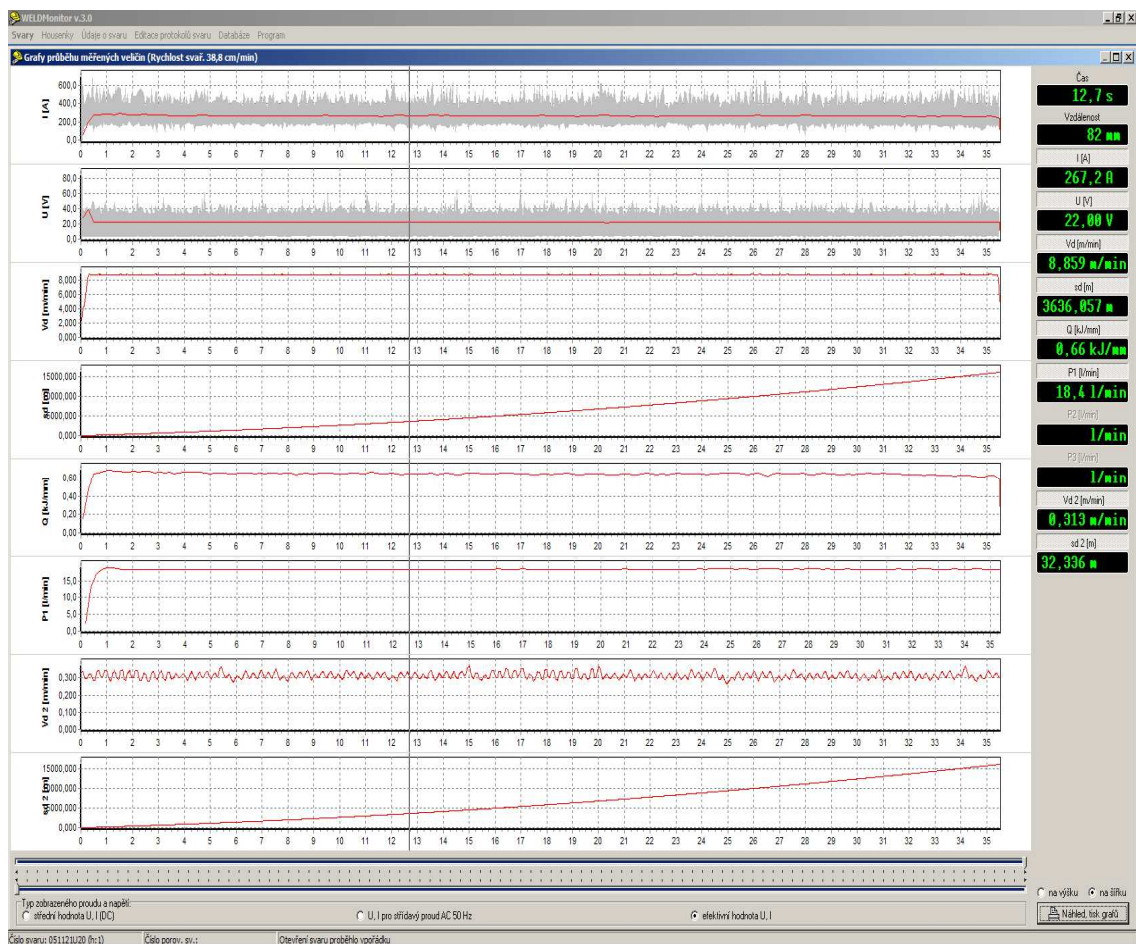
Obr. 43 upnutí vzorku do přípravku



Obr. 44 Nastavení hořáku vůči svarku

3.2.1.6 Monitorování svařovacích parametrů procesu MAG pomocí programu WeldMonitor 3.0

Připojením snímačů proudu, napětí, rychlosti svařování, rychlosti podávání drátu se svařovacím zdrojem a za pomoci monitorovacího programu WeldMonitor můžeme průběžně monitorovat základní parametry procesu svařování v celém časovém rozsahu. Výsledky dostáváme v grafické podobě (Obr. 45). Tento program navíc umožňuje detailní sledování hlavních parametrů – proudu a napětí s přenosovou frekvencí 25kHz pro sledování stability procesu.



Obr. 45 Pracovní plocha programu WeldMonitor verze 3.0

3.2.2 Laboratoř pro vyhodnocování makrosnímku

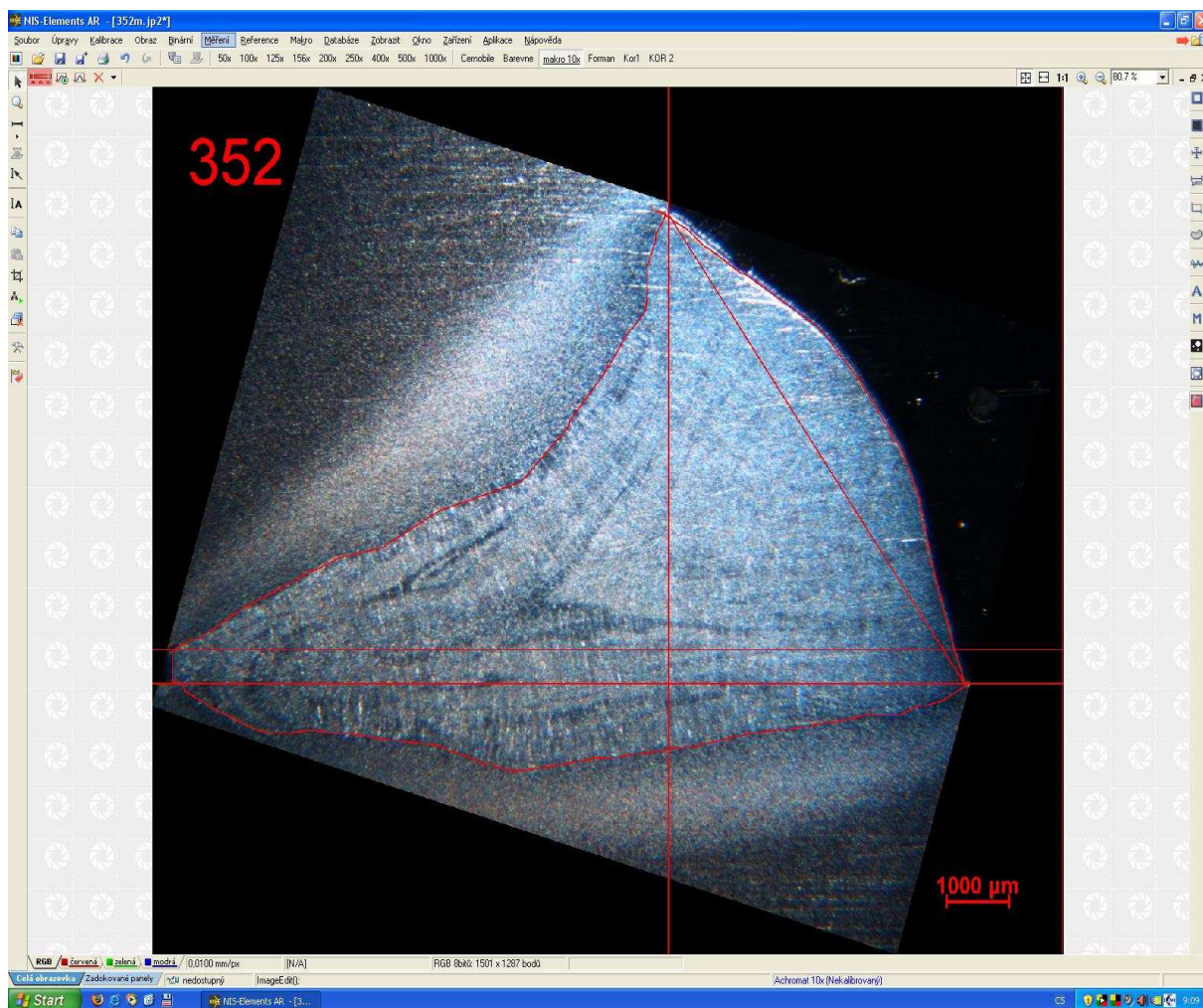


Obr. 46 Laboratoř pro vyhodnocování makrosnímku

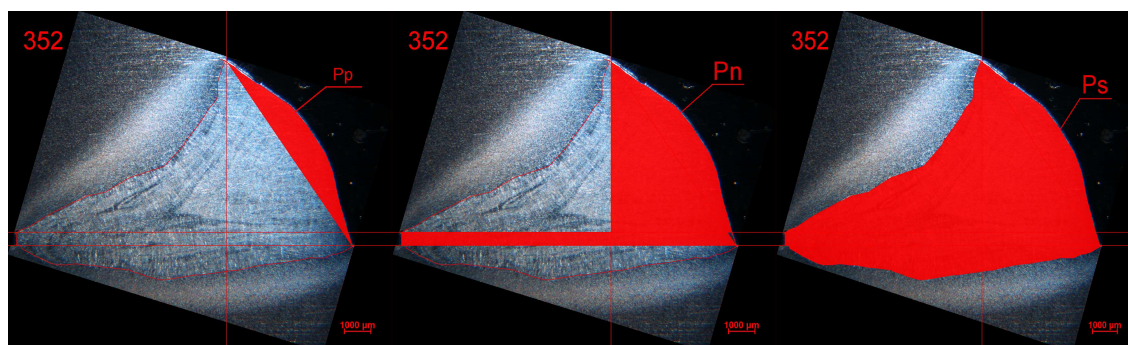
Metalografický výbrus je snímán přes optický mikroskop NEOPHOT 21 spolupracující s kamerou NIKON (ovládací jednotka DS – L1 pro kamery DS, hlava kamery DS – 5M), která je napojena na počítač s vyhodnocovacím softwarem NIS Elements 2.3CZ..

Vzorky byly zality do dentakrylu následně zbroušeny a naleptány 3% nitem. Snímky byly zhotoveny s 10x zvětšením přes mikroskop a digitální kameru.

Na (Obr. 47, 48) jsou uvedeny příklady zpracování snímku svaru programem NIS Elements 2.3CZ.



.Obr. 47 Pracovní plocha programu NIS Elements 2.3CZ



Obr. 48 Zobrazení plochy převýšení – Pp, plochy návaru Pn, plochy svaru Ps

3.3 Návrh experimentu

Při návrhu experimentu jsme vycházeli z práce [2], kde bylo stanoveno pole optimální efektivity pro drát $\varnothing 1,2\text{mm}$, směs plynu 68% Ar, 12% CO₂, 20% He s nulovou mezerou při sestavení s rychlostí drátu $V_d=13\text{m/min}$ a rychlostí svařování $V_s=0,7\text{m/min}$. Předpokládali jsme, že mezera umožní posun tohoto pole směrem k vyššímu výkonu tzn. K vyšším V_d a V_s . Proto jsme provedli základní soubor experimentů v této oblasti ($V_d=13,8\text{m/min}$ a $V_s=0,8\text{m/min}$) a soustředili se na sledování vlivu mezery a dále kombinaci vyosení hořáku a mezery, se kterou nebyly žádné předchozí zkušenosti.

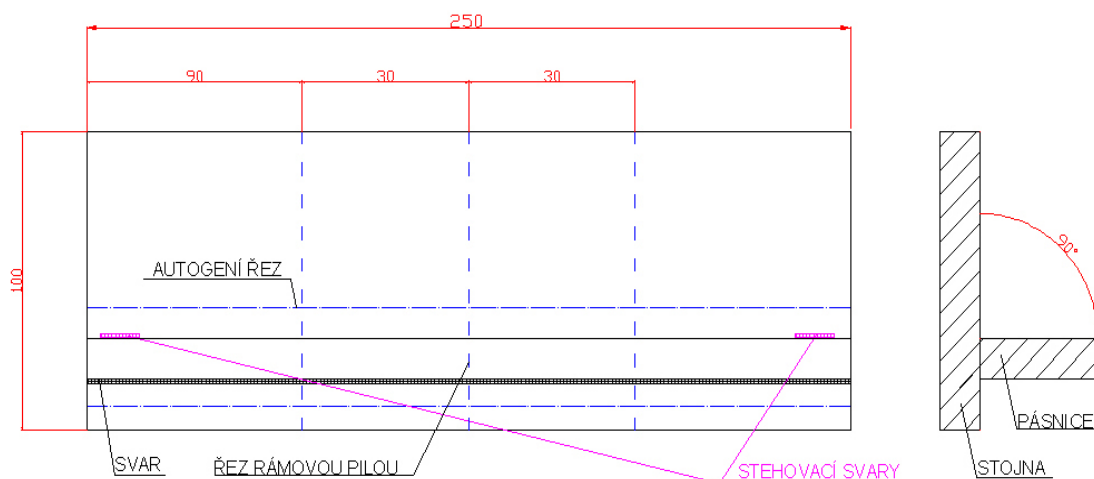
3.3.1 Zkušební svary

Při optimalizaci režimu svařování dle práce [2] s proměnlivou mezerou vytvořenou podložením stojny na jedné straně plíškem tl. 0,8mm (*Obr.49*). Měnila se velikost mezery od 0mm do 8mm.

Byly provedeny 3 řezy na každém vzorku (*Obr.50*). Výsledkem bylo zjištěno, že stojna, která byla na druhém konci volná se vlivem svařování stáhla natolik, že pouze v horním řezu se objevila mezera, jejíž velikost byla menší než nastavená.



Obr. 49 Vzorek pro zkušební svar

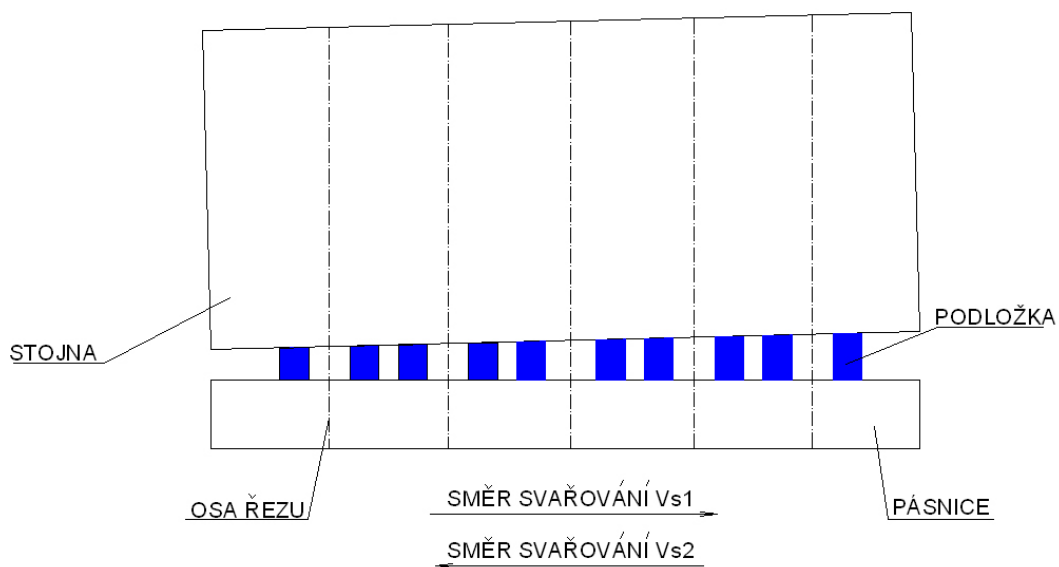


Obr. 50 Ukázka řezů na svářeném vzorku

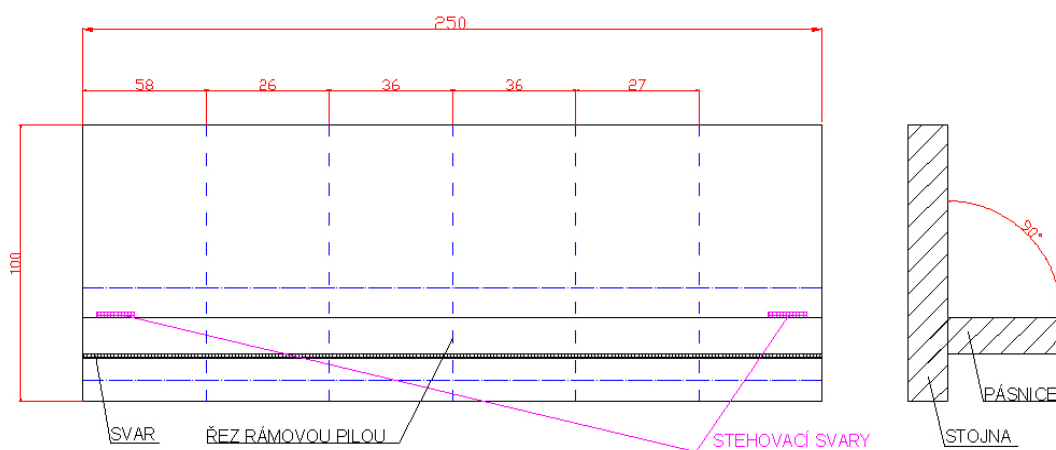
3.3.1.1 Opravné zkušební svary

Opravné zkušební svary byly provedeny s mezerou vymezenou několika plíšky s narůstající tloušťkou, první vzorek, svařovaný ve směru narůstající mezery a druhý naopak (Obr. 51). Parametricky byly tyto dva svary na horní hranici srovnávané oblasti viz práce [2], kde se už projevilo výrazné převýšení svaru. Bylo zhotoveno 5 řezů na každém vzorku (Obr. 52). V tomto případě mezery odpovídaly přibližně nastavovanému rozměru a podle předpokladu v opačném směru svařování byla mezera o 0,2 mm vyšší z důvodu zafixování mezery vzorku svarem. Bylo prokázáno, že tímto způsobem se dá tento šumový faktor vymezit, a proto se s ním dá počítat jako s proměnnou. Tyto dva svary nám potvrdily pozitivní vliv mezery na převýšení (Obr. 53, 54, 55, 56, 57)

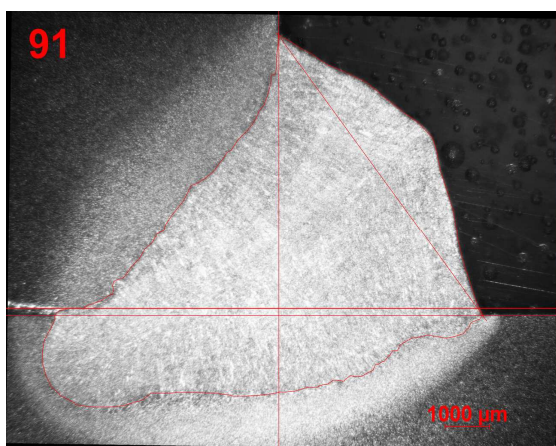
Zároveň bylo rozhodnuto, že všechny následující vzorky budou svařovány ve směru rostoucí mezery a dále že budou provedeny jen 3 řezy na každém vzorku: 1 ve středu svarku, 2. 30mm vlevo a 3. 30mm vpravo od středového řezu (Obr. 58, 59).



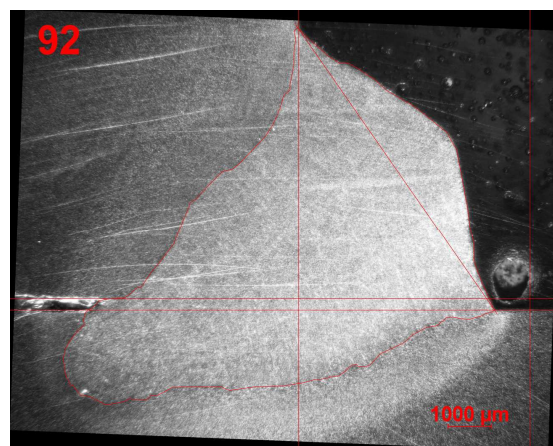
Obr. 51 Vzorek pro opravný zkušební svar



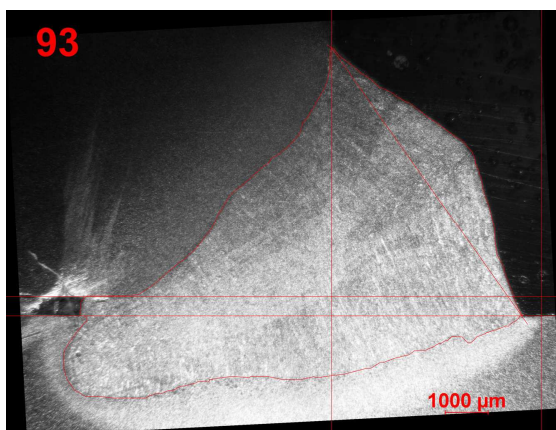
Obr. 52 Ukázka řezů na svařovaném vzorku



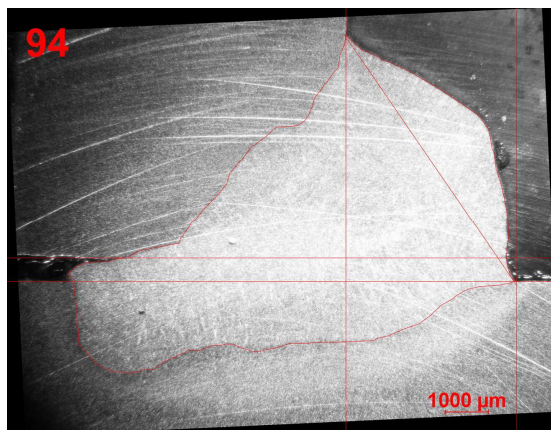
Obr. 53 svar č. 91



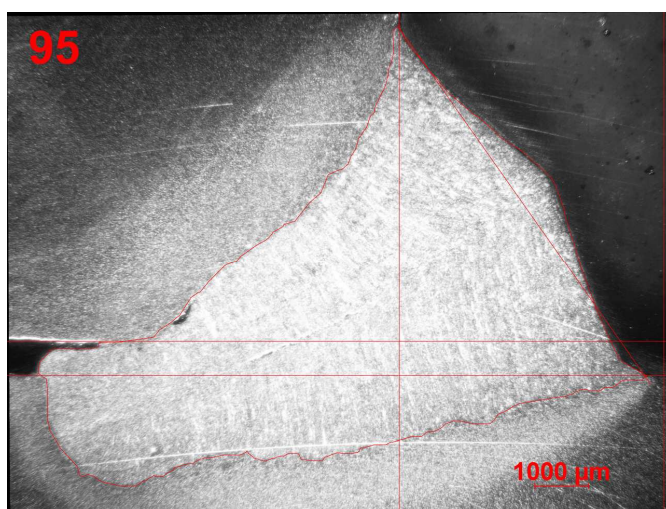
Obr. 54 svar č. 92



Obr. 55 svar č. 93



Obr. 56 svar č. 94



Obr. 57 svar č. 95

Tab. 11 Hodnoty zkušebních svarů

č.vz.	v_D	v_s	P_M	I	U	Q	z	r	v	m	P_N	P_s	E_z	E_n	E
91	13,83	0,8	18,7	397	28,4	7,1	5,03	1,43	8,71	0,15	20,97	44,37	0,566	0,878	0,497
92	13,83	0,8	18,7	397	28,4	7,1	5,22	1,45	8,91	0,28	21,36	43,84	0,577	0,872	0,503
93	13,83	0,8	18,7	397	28,4	7,1	5,90	1,28	9,51	0,44	21,85	45,48	0,61	0,847	0,516
94	13,83	0,8	18,7	397	28,4	7,1	5,94	1,32	9,13	0,53	20,64	43,8	0,612	0,77	0,471
95	13,83	0,8	18,7	397	28,4	7,1	5,97	0,72	9,71	0,63	21,27	44,92	0,613	0,906	0,556

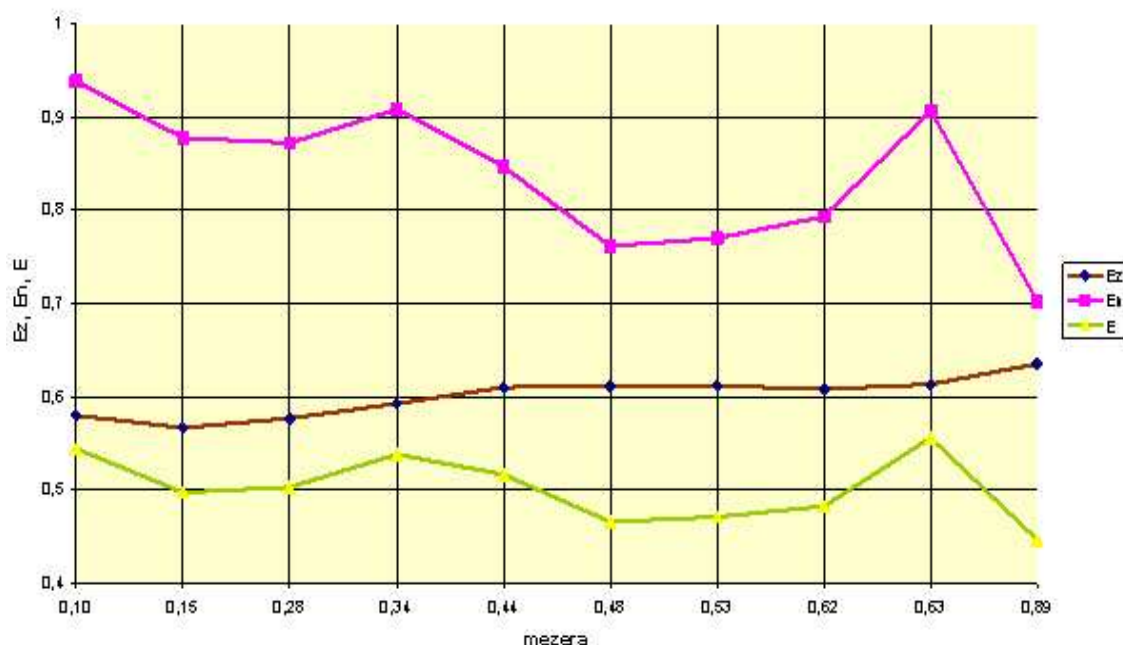


Obr. 58 Způsob přípravy vzorků



Obr. 59 Způsob přípravy vzorků

Graf č. 1 Závislost efektivity na velikosti mezery



Legenda:

Ez – efektivita závaru, En – efektivita návaru, E – efektivita celková

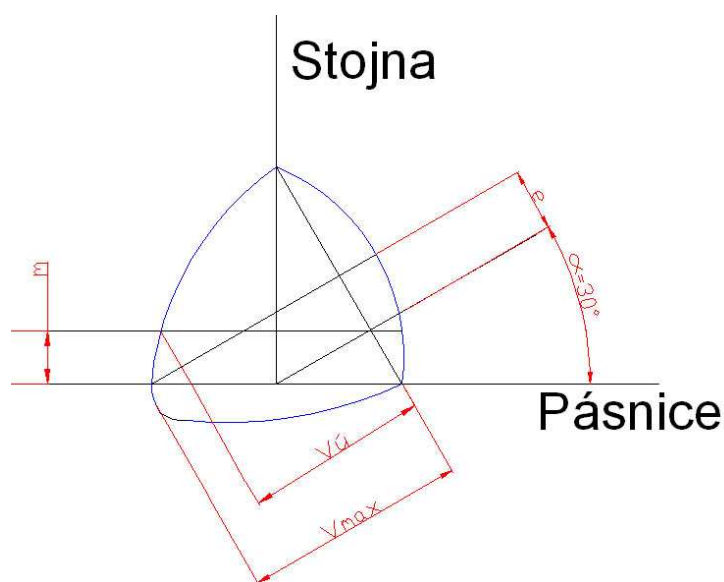
Diskuze:

Z grafu č.1 je patrné, že efektivita závaru s velikostí mezery v daném rozsahu při daném režimu svařování roste, i když na konci jen nepatrně. Efektivita návaru naopak s rostoucí mezerou klesá. Celková efektivita v daném rozsahu nejprve roste a pak klesá. Poslední vzorek 95 (Obr. 57) nelze započítat, protože je již poznamenán blízkostí okraje svaru a větším prohřátím vzorku. Proto byl nadále počet řezů u jednoho vzorku omezen na tři.

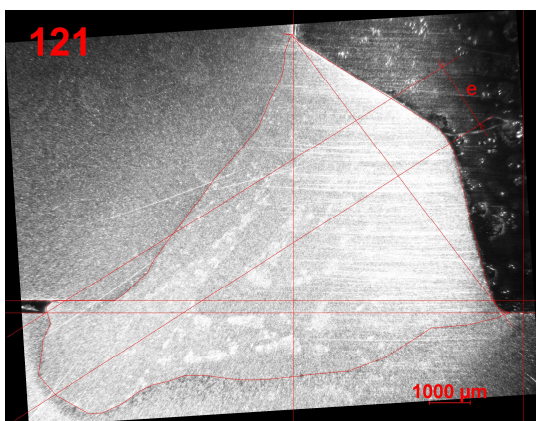
3.3.2 Měření excentricity závaru

Problém, který dosud nebyl řešen, byla excentricita hloubky největšího závaru vzhledem k mezeře (Obr. 60). Proto byla navržena další sada experimentů, kde ve vybrané parametrické oblasti bylo zhotoveno několik svarů pod stejným úhlem a stejnou excentricitou jako u práce [2] s různou velikostí mezery. Výsledkem bylo zjištění, že směr závaru se s velikostí mezery výrazně nemění, takže nebyl potvrzen předpoklad, že se závar bude stáčet ve směru menšího odvodu tepla (do stojny). Naopak hloubka závaru do pásnice zachovávala směr úhlu hořáku. To nám na druhou stranu umožnilo zjistit přesnou míru excentricity max. hloubky závaru vzhledem k mezeře. viz (Obr. 61, 62, 63, 64)

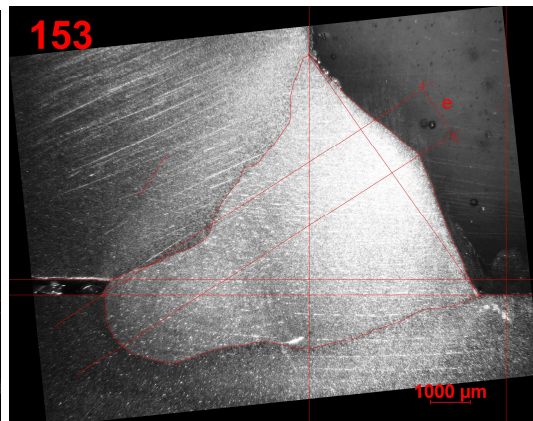
Vyhodnocení efektivity dosavadních svarů nám již dalo přibližný odhad optimální mezery. Pro hlavní sérii experimentů bylo rozhodnuto vymezit oblast tohoto parametru na 0,3 – 0,7mm. V další fázi postupujeme podle statistického návrhu experimentu, kde zkoumaná oblast byla posunuta směrem k vyšší rychlosti drátu a tím tedy k vyššímu tavnému výkonu. Excentricita byla zvolena dle naměřené velikosti z této série.



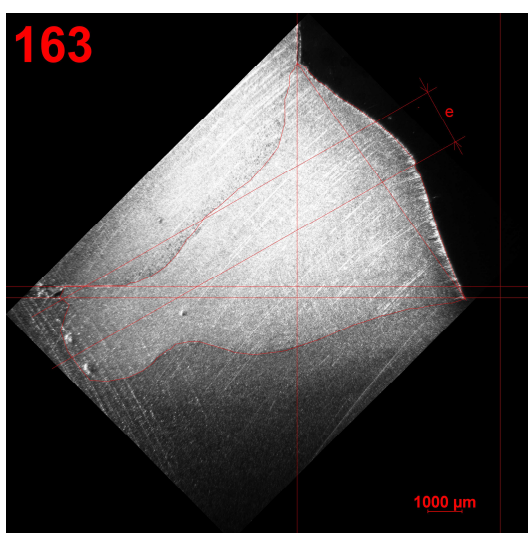
Obr. 60 Způsob měření excentricity



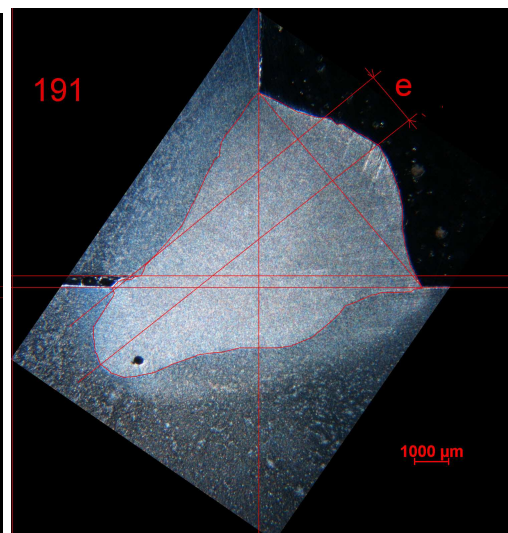
Obr. 61 Svar č. 121



Obr. 62 Svar č. 153



Obr. 63 Svar č. 163



Obr. 64 Svar č. 191

Tab. 12 Hodnoty svarů s měřenou excentricitou e

č.vz.	v _D	vs	l	U	z	r	v	e
121	14,30	0,7	405	28,8	5,88	1,49	9,95	1,69
153	11,88	0,821	370	27,6	4,61	0,83	8,12	1,32
163	14,88	0,827	423	29	6,41	1,13	10,41	1,61
191	13,37	0,82	388	28,5	5,00	1,71	8,66	1,42

3.3.3 Experimentální program optimalizace efektivity E – plech 8 mm

Ve shodě s předchozími pracemi byl vytvořen experimentální program podle DOE [11] metody centrální kompozice pro optimalizaci efektivity provedení svaru s použitím tří parametrů v 5-ti úrovních.

Rozsah vstupních parametrů:

V_d , V_s , m

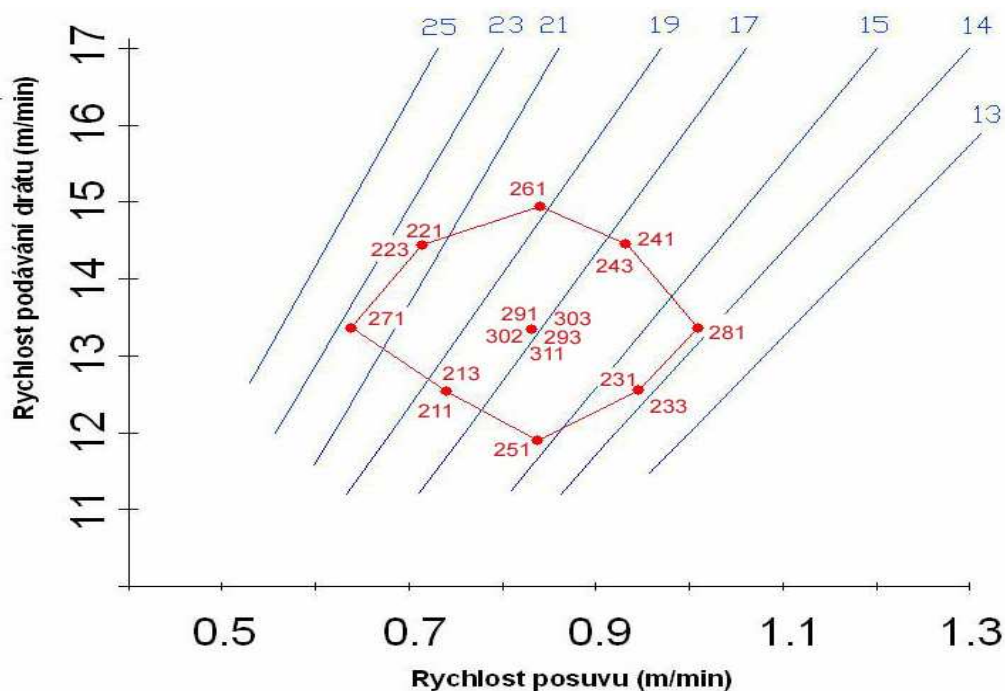
Tab. 13 Hodnoty parametrů pro plán experimentů

hladiny	$(-)\sqrt{3}$	-1	0	+1	$\sqrt{3}$
v_D (m/min.)	12	12,6	13,5	14,4	15
v_S (mm ²)	0,6	0,68	0,8	0,92	1,0
m (mm)	0,2	0,35	0,5	0,7	0,8

Tab. č. 14 Tabulka plánu experimentů podle statistického návrhu

vzorek	V_D (m/min)	V_S (m/min)	m (mm)	V_D (m/min)	V_S (m/min)	m (mm)
211	-1	-1	-1	12,6	0,68	0,35
221	1	-1	-1	14,4	0,68	0,35
231	-1	1	-1	12,6	0,92	0,35
241	1	1	-1	14,4	0,92	0,35
213	-1	-1	1	12,6	0,68	0,7
223	1	-1	1	14,4	0,68	0,7
233	-1	1	1	12,6	0,92	0,7
243	1	1	1	14,4	0,92	0,7
251	$(-)\sqrt{3}$	0	0	12	0,8	0,5
261	$\sqrt{3}$	0	0	15	0,8	0,5
271	0	$(-)\sqrt{3}$	0	13,5	0,6	0,5
281	0	$\sqrt{3}$	0	13,5	1	0,5
291	0	0	$(-)\sqrt{3}$	13,5	0,8	0,2
293	0	0	$\sqrt{3}$	13,5	0,8	0,8
302	0	0	0	13,5	0,8	0,5
303	0	0	0	13,5	0,8	0,5
311	0	0	0	13,5	0,8	0,5
jmenovité hodnoty				fyzikální navrhnuté		

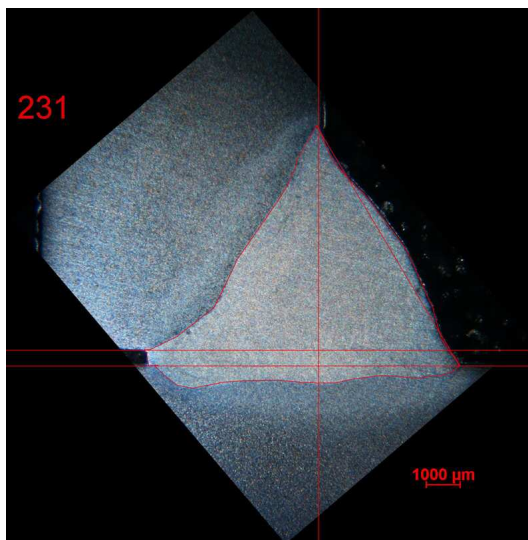
Graf č. 2 Rozložení svarů pro plán experimentů - plech tl. 8 mm



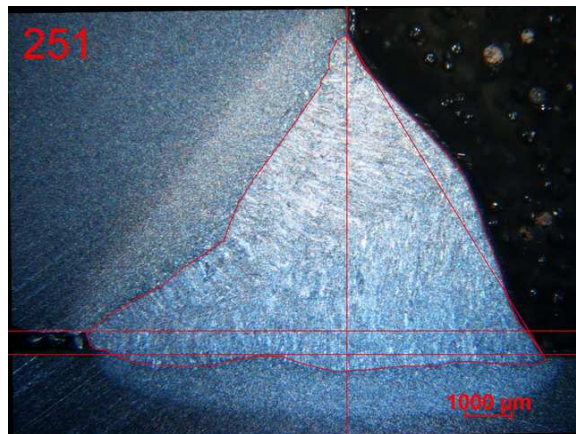
Tab. 15 Soubor experimentů – plech tl. 8mm

Č. vz.	Vstupní parametry					Rozměrová analýza						Výsledky		
	Vd	Vs	I	U	Q	z	r	v	m	P _N	P _S	E _z	E _n	E
211	12,44	0,73	374	28,1	7,26	5,17	0,71	8,78	0,40	22,0	42,3	0,576	0,834	0,480
212	12,44	0,728	381	28	7,39	5,21	0,90	8,81	0,61	23,7	43,9	0,578	0,775	0,448
213	12,44	0,729	376	28,1	7,30	5,90	0,73	8,90	0,87	23,3	44,3	0,612	0,636	0,389
221	14,33	0,713	385	29	7,89	5,67	1,50	9,60	0,40	26,2	51,7	0,579	0,819	0,474
222	14,34	0,707	385	29,1	7,99	5,93	1,72	9,81	0,56	28,9	52,6	0,590	0,738	0,435
223	14,33	0,713	393	29	8,06	7,48	0,77	11,55	0,68	29,4	56,6	0,653	0,806	0,526
231	12,45	0,94	375	28,1	5,65	4,16	0,41	7,70	0,46	19,3	35,8	0,551	0,864	0,476
232	12,45	0,942	377	28,1	5,67	4,44	0,96	7,81	0,57	20,7	37,5	0,569	0,757	0,431
233	12,45	0,94	375	28,1	5,65	5,33	0,26	8,27	0,73	17,1	35,9	0,618	0,774	0,479
241	14,33	0,933	398	28,9	6,21	5,45	0,94	9,51	0,68	26,0	45,1	0,604	0,814	0,492
242	14,33	0,94	405	28,8	6,25	5,21	0,99	8,56	0,75	23,1	40,5	0,593	0,691	0,410
243	14,33	0,93	403	28,8	6,29	5,80	0,99	8,33	0,90	19,4	38,3	0,621	0,593	0,368
251	11,90	0,83	365	27,7	6,14	4,40	0,56	8,06	0,52	20,7	36,9	0,555	0,860	0,478
261	14,88	0,832	409	29,2	7,23	5,84	0,91	9,68	0,51	25,4	46,6	0,602	0,814	0,490
271	13,39	0,64	373	28,6	8,40	5,61	1,50	8,90	0,41	30,0	54,9	0,570	0,581	0,332
281	13,40	1,02	392	28,4	5,50	4,51	1,20	7,52	0,48	18,0	34,7	0,574	0,731	0,420
291	13,37	0,836	391	28,4	6,69	5,32	1,27	8,74	0,43	22,1	40,2	0,592	0,764	0,453
292	13,37	0,833	390	28,4	6,70	5,53	1,03	9,03	0,63	24,1	43,5	0,602	0,722	0,435
293	13,38	0,835	386	28,5	6,64	5,44	0,34	8,89	0,92	24,4	43,7	0,598	0,707	0,423
301	13,40	0,822	396	28,4	6,90	5,18	1,03	8,96	0,45	22,9	43,3	0,583	0,845	0,492
302	13,40	0,827	397	28,4	6,87	5,45	1,00	9,02	0,49	22,6	42,6	0,597	0,794	0,474
303	13,40	0,83	396	28,4	6,83	5,98	1,23	8,51	0,60	20,5	40,4	0,623	0,579	0,360
311	13,40	0,836	405	28,2	6,89	5,16	0,5	8,88	0,58	21,35	40,77	0,584	0,875	0,511
313	13,40	0,827	405	28,2	6,96	6,28	1,13	9,19	0,75	22,12	41,7	0,635	0,626	0,397

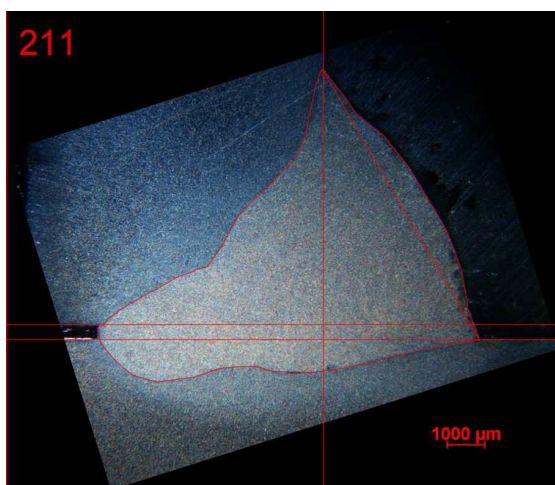
Ukázky svarů na plechu 8 mm a tabulka hodnot.



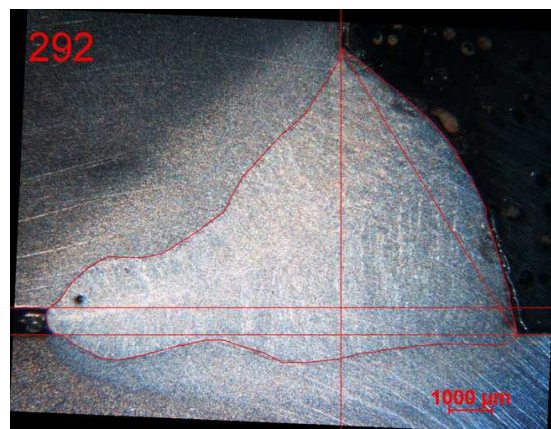
Obr. 65 Svar č. 231



Obr. 66 Svar č. 251



Obr. 67 Svar č. 211

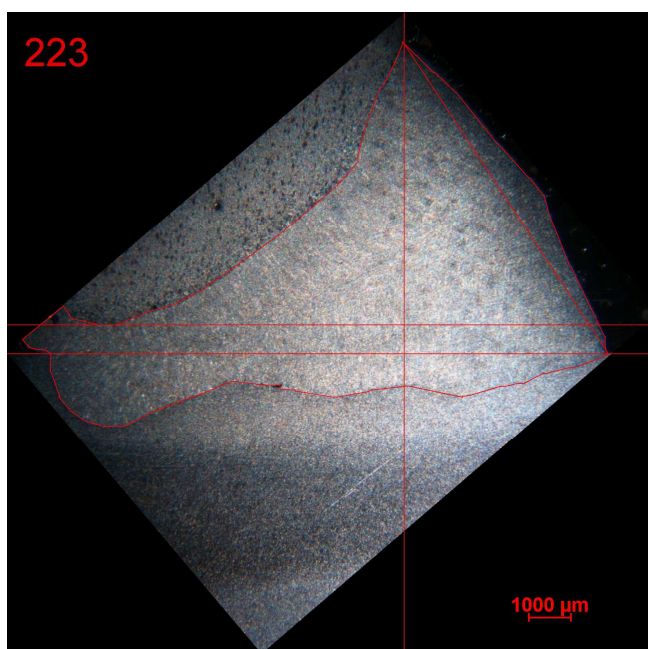


Obr. 68 Svar č. 292

Tab. 16 Hodnoty ukázkových svarů – plech 8mm

č.vz.	v_D	v_S	z	r	v	m	E_z	E_n	E
231	12,45	0,94	4,16	0,41	7,70	0,46	0,551	0,864	0,476
251	11,9	0,83	4,40	0,56	8,06	0,52	0,555	0,86	0,478
211	12,44	0,73	5,17	0,71	8,78	0,4	0,576	0,834	0,480
292	13,37	0,833	5,53	1,03	9,03	0,63	0,602	0,722	0,435

Diskuze:



Obr. 69 Svar č. 223

Tab. 17 Hodnoty svaru č. 223

č.vz.	v_D	v_S	z	r	v	m	E_z	E_n	E
223	14,33	0,72	7,48	0,77	11,55	0,68	0,653	0,806	0,526

Hlavní série potvrdila pozitivní vliv mezery na zvýšení efektivity svařování. Intenzita procesu byla tak vysoká, že v některých případech došlo k provaření mezery a vytečení tavné lázně na druhou stranu svaru (Obr. 69). Z tohoto důvodu nebylo možné u této série změřit optimum. Proto bylo rozhodnuto provést znovu soubor experimentů na plechu tloušťky 12mm. Ten má sice vyšší odvod tepla ale jak bylo prokázáno v předchozí práci [14], tloušťka materiálu v rozsahu 8 až 16mm nemá zásadní vliv na umístění oblasti maximální efektivity provedení svaru za daných podmínek. Pole efektivity má větší gradient nárůstu ale jeho umístění je shodné.

3.3.4 Experimentální program optimalizace efektivity E – plech 12mm

S ohledem na kladné výsledky změřitelných svarů (Obr. 65, 68, 69, 70) na plechu tl. 8 mm dle Tab. 16 této experimentální série jsme pro opakovanou sérii

na plechu tl. 12 mm zvolili rozsah parametrů ještě směrem k vyšším hodnotám v_D a tím i proudu a tavného výkonu, rozsah mezery zůstal stejný.

Rozsah vstupních parametrů:

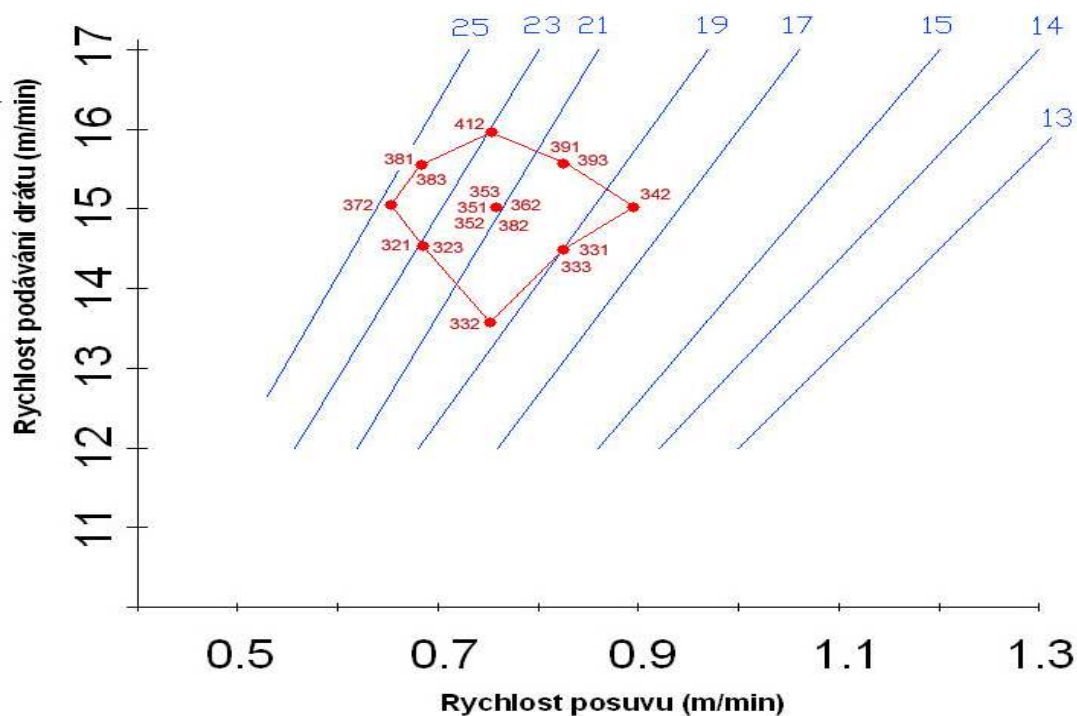
Tab. 18 Hodnoty parametrů pro plán experimentů – plech tl. 12mm

hladiny	$(-)\sqrt{3}$	-1	0	+1	$\sqrt{3}$
v_D (m/min.)	13,5	14,4	15	15,5	16
v_S (mm ²)	0,65	0,68	0,75	0,83	0,9
m (mm)	0,5	0,55	0,65	0,75	0,8

Tabulka č. 19 plán experimentů podle statistického návrhu – plech tl 12mm

vzorek	V_D (m/min)	V_S (m/min)	m(mm)	V_D (m/min)	V_S (m/min)	m(mm)
321	-1	-1	-1	14,4	0,68	0,55
381	1	-1	-1	15,5	0,68	0,55
331	-1	1	-1	14,4	0,83	0,55
391	1	1	-1	15,5	0,83	0,55
323	-1	-1	1	14,4	0,68	0,75
383	1	-1	1	15,5	0,68	0,75
333	-1	1	1	14,4	0,83	0,75
393	1	1	1	15,5	0,83	0,75
332	$(-)\sqrt{3}$	0	0	13,5	0,75	0,65
412	$\sqrt{3}$	0	0	16	0,75	0,65
372	0	$(-)\sqrt{3}$	0	15	0,65	0,65
342	0	$\sqrt{3}$	0	15	0,9	0,65
351	0	0	$(-)\sqrt{3}$	15	0,75	0,5
353	0	0	$\sqrt{3}$	15	0,75	0,8
352	0	0	0	15	0,75	0,65
382	0	0	0	15	0,75	0,65
362	0	0	0	15	0,75	0,65
jmenovité hodnoty			fyzikální navrhnuté			

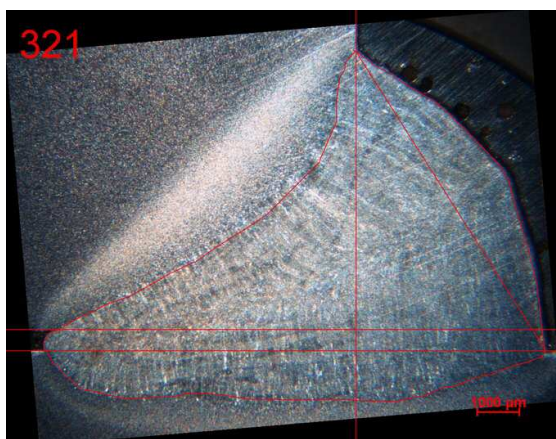
Graf č. 3 Rozložení svarů pro plán experimentů - plech tl. 12 mm



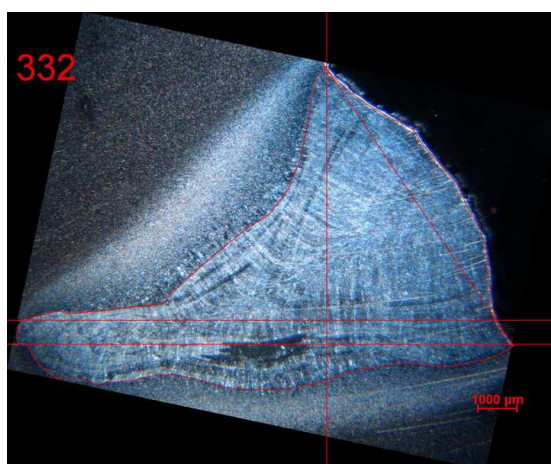
Tab. 20 Soubor experimentů – plech tl. 12mm

Č. vz.	Vstupní parametry					Rozměrová analýza						Výsledky		
	Vd	Vs	I	U	Q	z	r	v	m	P _N	P _S	E _z	E _n	E
321	14,34	0,68	389	29,1	8,40	6,23	1,46	10,00	0,50	27,89	53,84	0,598	0,755	0,452
323	14,33	0,678	382	29,2	8,29	6,47	1,42	9,87	0,68	27,90	53,90	0,608	0,656	0,398
331	14,34	0,8	402	28,9	7,32	6,52	1,34	9,93	0,58	24,70	47,84	0,632	0,714	0,451
332	14,33	0,8	404	28,8	7,33	6,37	1,10	10,30	0,61	27,86	49,37	0,626	0,770	0,482
333	14,33	0,8	406	28,8	7,37	6,86	1,59	10,17	0,72	27,16	49,72	0,645	0,608	0,393
341	14,34	0,918	419	28,7	6,60	5,59	0,68	8,94	0,50	20,66	40,50	0,609	0,795	0,484
342	14,30	0,93	416	28,7	6,47	5,88	0,88	9,50	0,64	24,07	42,92	0,625	0,772	0,482
343	14,32	0,955	416	28,7	6,30	6,12	1,13	9,11	0,77	22,65	41,46	0,639	0,607	0,388
351	14,83	0,738	399	29,4	8,01	6,47	2,03	9,86	0,53	28,29	52,84	0,614	0,624	0,383
352	14,83	0,735	402	29,3	8,08	6,41	1,15	10,30	0,48	27,01	52,78	0,595	0,746	0,444
353	14,83	0,737	407	29,3	8,16	6,57	1,00	10,41	0,78	29,07	49,96	0,618	0,733	0,453
363	14,85	0,865	423	29	7,15	6,10	1,42	9,28	0,63	23,48	44,53	0,620	0,683	0,423
371	14,90	0,66	400	29,5	9,01	6,47	1,66	10,26	0,57	28,47	57,40	0,599	0,758	0,454
381	15,34	0,72	400	29,9	8,37	6,12	1,83	9,84	0,63	29,17	55,72	0,591	0,703	0,416
382	15,34	0,715	408	29,7	8,54	6,88	2,31	9,95	0,65	27,96	53,56	0,622	0,574	0,357
383	15,34	0,722	407	29,7	8,44	6,04	2,25	9,47	0,70	30,49	56,66	0,588	0,580	0,341
391	15,35	0,84	427	29,4	7,53	6,27	1,90	9,37	0,56	26,25	49,45	0,619	0,578	0,358
392	15,35	0,841	428	29,4	7,54	6,99	1,66	10,20	0,64	26,24	50,16	0,648	0,623	0,404
401	15,35	0,654	396	29,8	9,09	5,88	1,94	9,74	0,48	29,68	57,94	0,568	0,751	0,426
403	15,36	0,657	397	29,9	9,11	6,50	2,30	9,73	0,72	31,11	57,34	0,595	0,562	0,334
412	15,92	0,77	423	29,9	8,28	7,29	2,80	10,28	0,61	29,65	57,62	0,642	0,486	0,312
413	15,92	0,766	419	30	8,27	6,90	1,92	10,18	0,70	28,29	56,38	0,627	0,615	0,386

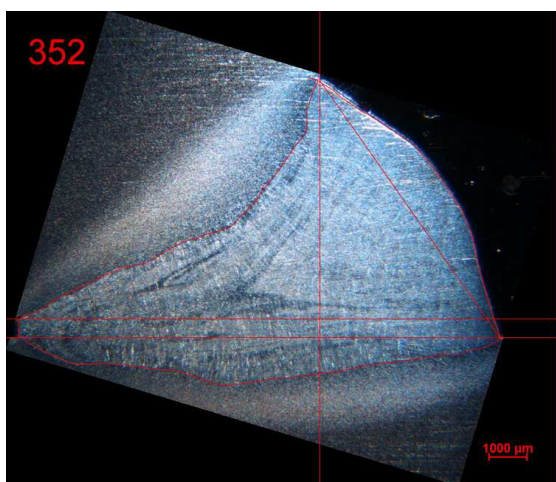
Ukázky svarů na plechu 8 mm a tabulka hodnot.



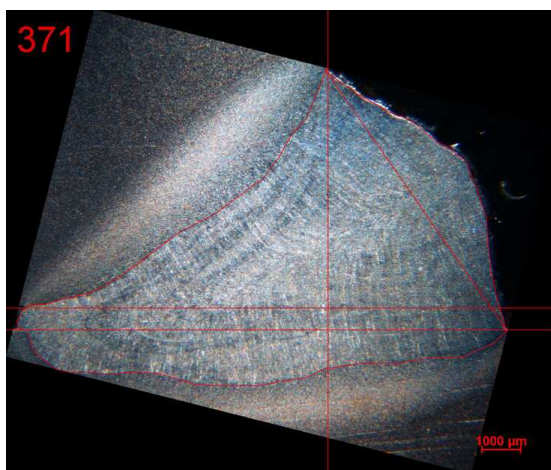
Obr. 70 Svar č. 321



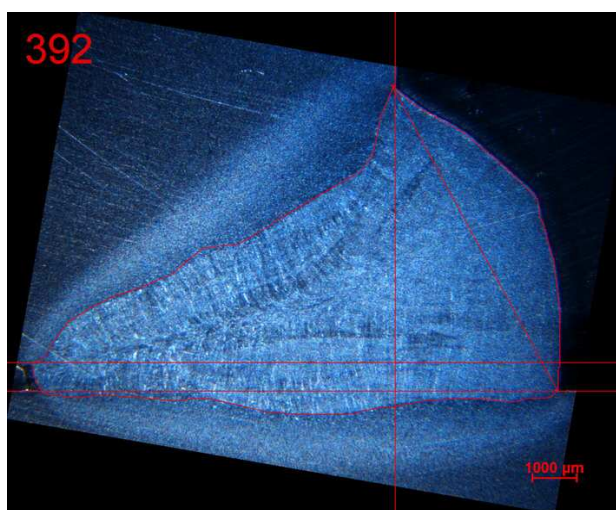
Obr. 71 Svar č. 332



Obr. 72 Svar č. 352



Obr. 73 Svar č. 371



Obr. 74 Svar č. 392

Tab. 21 Hodnoty ukázkových svarů – plech 12mm

č.vz.	v_D	v_S	z	r	v	m	E_z	E_n	E
321	14,34	0,68	6,23	1,46	10	0,5	0,598	0,755	0,452
332	14,33	0,8	6,37	1,1	10,3	0,61	0,626	0,77	0,482
352	14,83	0,735	6,41	1,15	10,3	0,48	0,595	0,746	0,44
371	14,9	0,66	6,47	1,66	10,3	0,57	0,599	0,758	0,454
392	15,35	0,841	6,99	1,66	10,2	0,64	0,648	0,623	0,404

3.4 Zhodnocení a porovnání výsledků

Po provedení rozměrové analýzy byla výpočtová část realizována pomocí matematického programu R Gui. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 15, 20 a v Grafu č. 4. Tímto programem byl též proveden výpočet regresních koeficientů metodou nejmenších čtverců, úprava matematických modelů a první derivací regresních funkcí dle jednotlivých parametrů, kterými získáme přesné umístění optimálních bodů, pokud se nacházejí v parametricky vymezeném prostoru.

Výpis hodnot vypočtených koeficientů v programu R-Gui včetně statistických údajů pro posouzení jejich statistické významnosti:

Call:

```
lm(formula = Ef ~ x1 + x2 + x3 + x12 + x22 + x32 + x1x2 + x1x3 + x2x3)
```

Residuals:

```
Min      1Q  Median      3Q      Max
```

```
-0.110003 -0.031233 0.004373 0.031218 0.097464
```

Coefficients:

```
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
```

```
(Intercept) 0.4513427 0.0155583 29.010 <2e-16 ***
```

```
x1          -0.0223194 0.0098394 -2.268 0.0294 *
```

```
x2          -0.0046744 0.0149257 -0.313 0.7560
```

```
x3          -0.0222182 0.0149882 -1.482 0.1469
```

```
x12         -0.0048938 0.0090464 -0.541 0.5919
```

x22	-0.0352357	0.0157148	-2.242	0.0312 *
x32	-0.0244350	0.0157559	-1.551	0.1297
x1x2	-0.0065381	0.0129880	-0.503	0.6178
x1x3	0.0004262	0.0132544	0.032	0.9745
x2x3	0.0414867	0.0267677	1.550	0.1299

Signif. codes: 0 ,***' 0.001 ,**' 0.01 ,*' 0.05 ,.' 0.1 , , 1

Residual standard error: 0.04664 on 36 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.3858, Adjusted R-squared: 0.2323

F-statistic: 2.513 on 9 and 36 DF, p-value: 0.02397

Redukovaný model má velmi jednoduchý tvar a byl stejně jako původní testován F-testem na hladině významnosti 0,05, tedy s 95 % pravděpodobností a vyhověl.

$$E = 0.4513427 - 0.02231943 m - 0.03523575 v_d^2$$

Optimální řešení:

$$E = 0.4830491$$

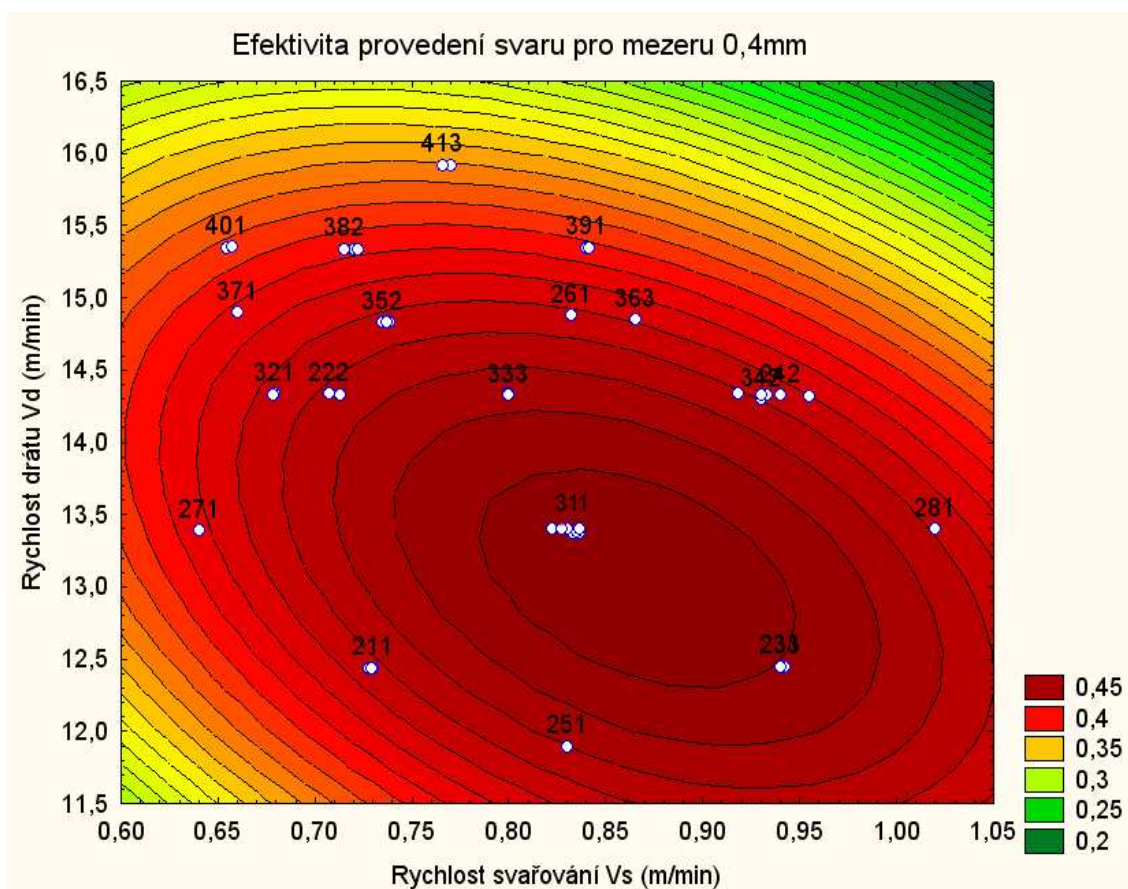
$$m = 0.4$$

$$V_d = 13.48739$$

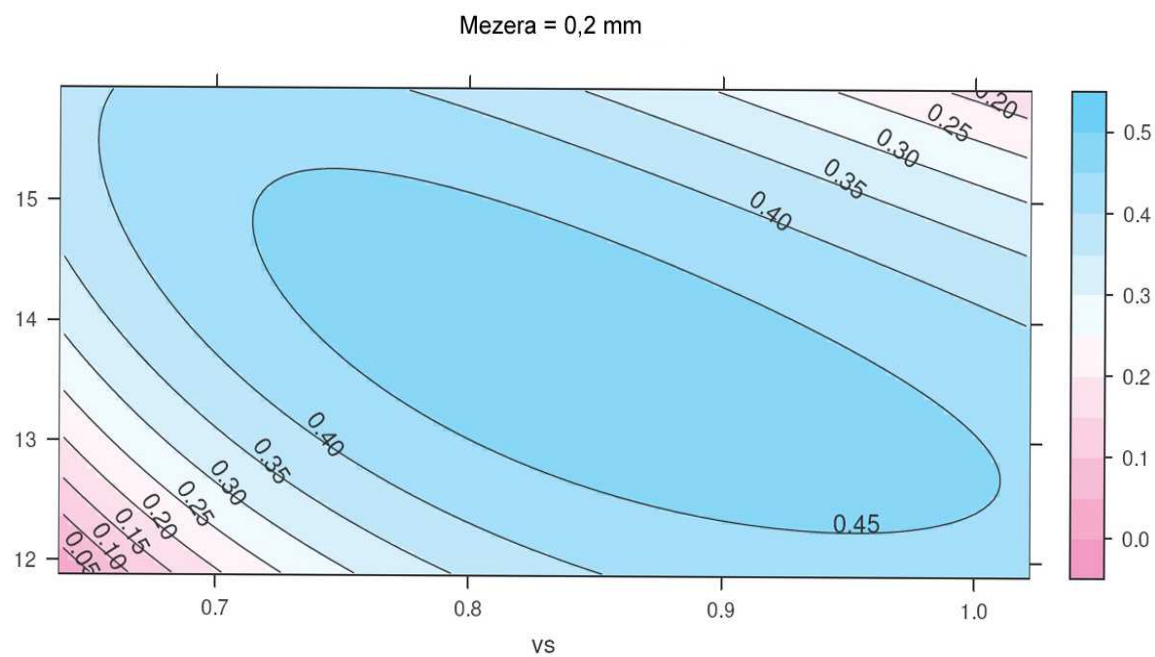
$$P_s = 16.61981$$

$$V_s = 0.8439857$$

Graf č. 4 Efektivita provedení svaru ze souborů – plech 8 a 12mm

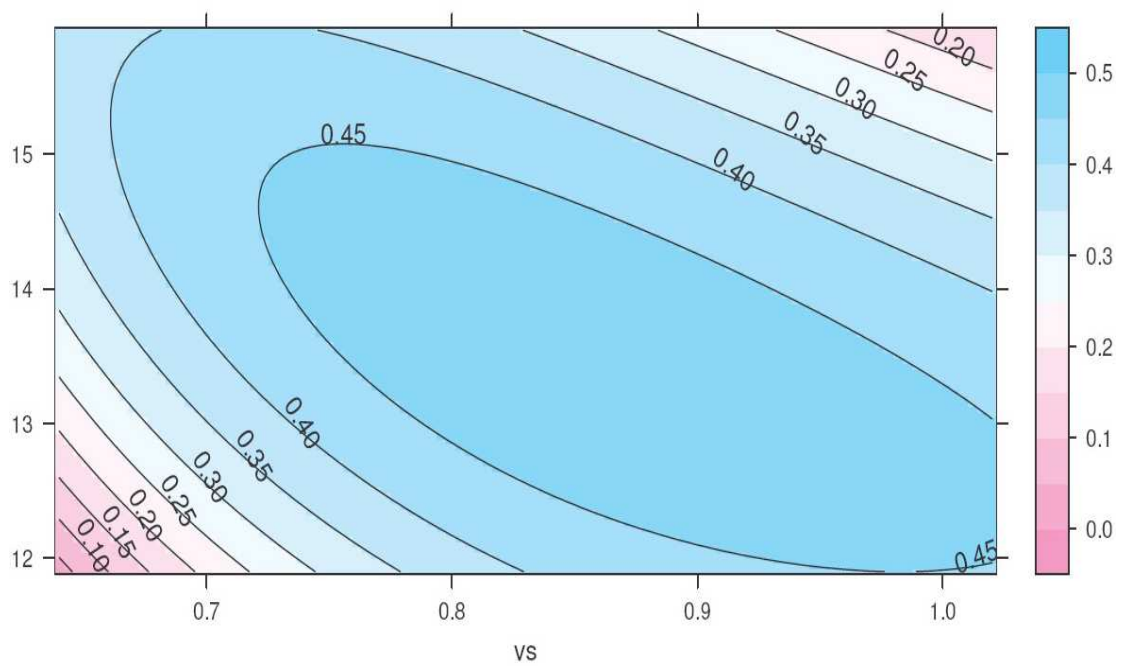


Graf č. 5 Pole efektivity v hladině řezu 0,2 mm



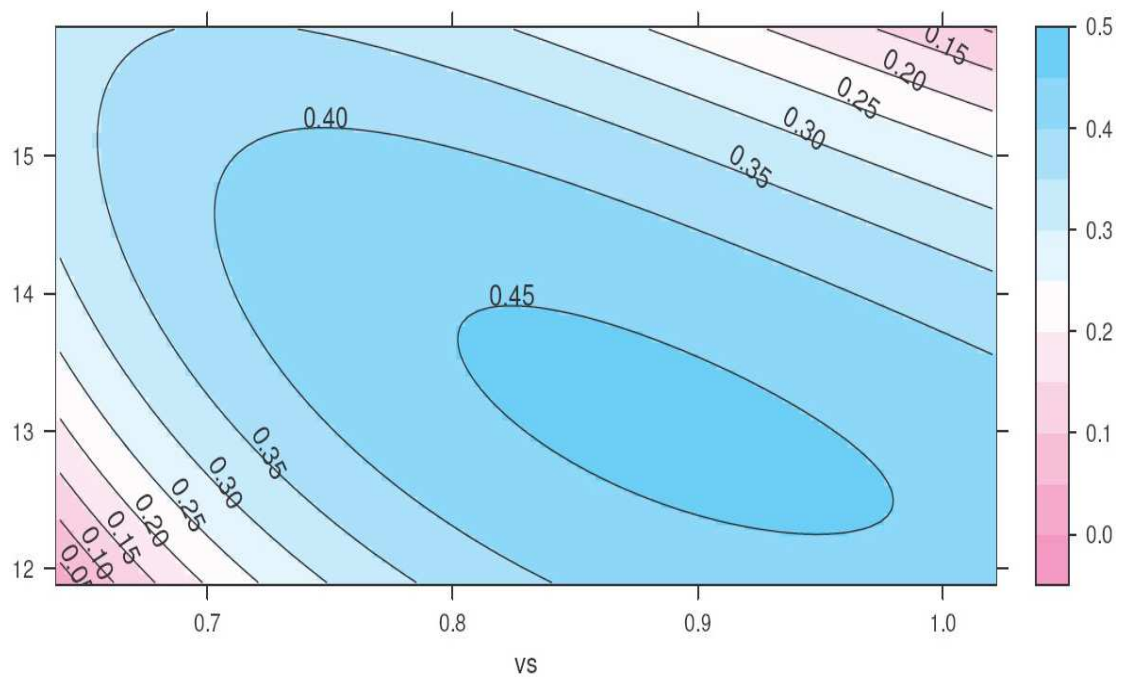
Graf č. 6 Pole efektivity v hladině řezu 0,4 mm

Mezera = 0,4 mm



Graf č. 7 Pole efektivity v hladině řezu 0,7 mm

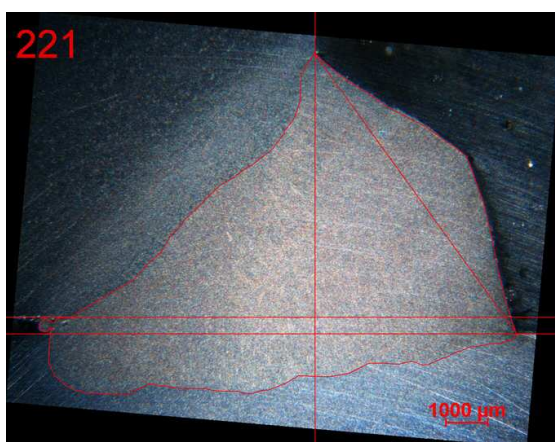
Mezera = 0,7 mm



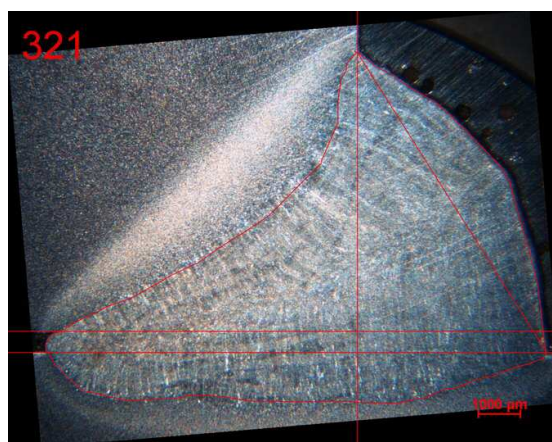
Vzhledem k tomu, že jsme optimalizovali 3-rozměrné parametrické pole, uvádím pro třetí parametr (mezeru) prostorové řezy v hladinách $m = 0,2$ (Graf č.5), $m = 0,4$ (Graf č. 6), $m = 0,7$ (Graf č. 8).

Porovnáním těchto řezů můžeme zjistit, že střed optimalizačního pole se vlivem změny mezery nemění. Pole nejvyšší efektivity se se změnou velikostí mezery od optimální hladiny zužuje (Graf č. 6).

Porovnání vzorků svařovaných stejným režimem s rozdílnou tloušťkou plechů (Obr. 75) plech - 8mm, (Obr. 76) plech – 12mm



Obr. 75 Svar č. 321

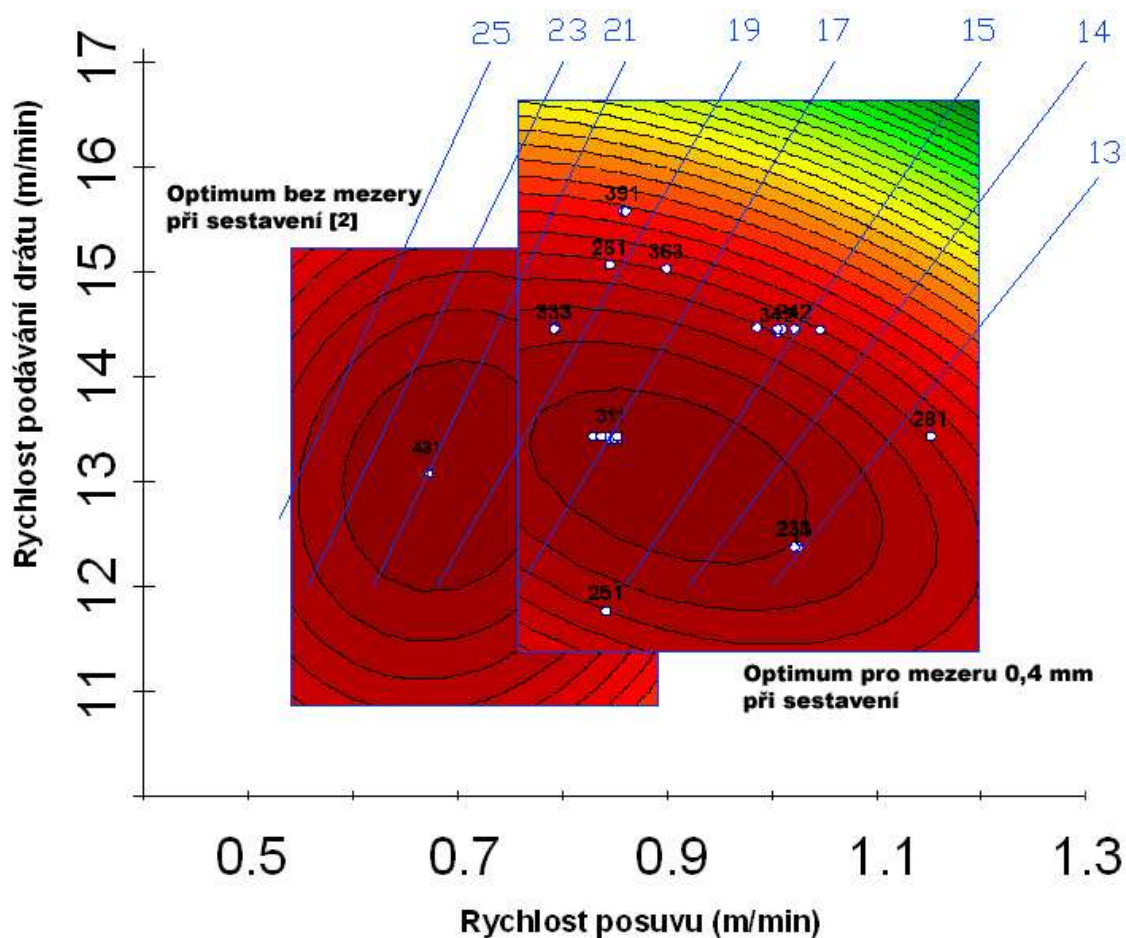


Obr. 76 Svar č. 321

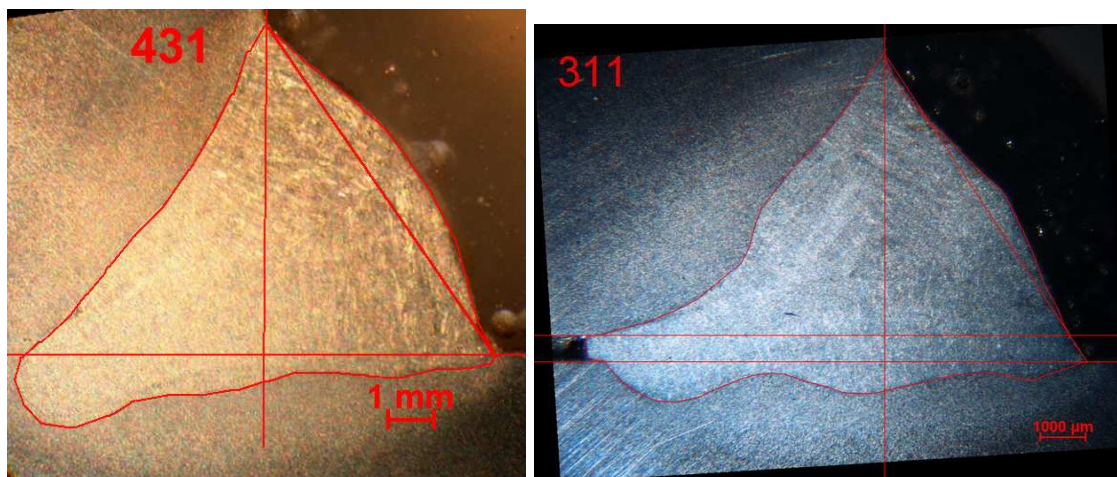
Tab. 22 Hodnoty porovnávacích svarů tl. plechů 8 a 12mm

Č.vz.	Vd	Vs	I	U	z	r	v	m	P _N	P _S	E _Z	E _n	E
221	14,33	0,713	385	29	5,67	1,50	9,60	0,40	26,2	51,7	0,579	0,819	0,474
331	14,34	0,8	402	28,9	6,52	1,34	9,93	0,58	24,70	47,84	0,632	0,714	0,451

Graf č. 8 Porovnání optimalizací s mezerou a bez mezery při sestavení



Porovnání svarů umístěných ve středu optimalizačního pole efektivity Graf č. 8



Obr. 78 Svar č. 431

Obr. 79 Svar č. 311

Tab. 23 Hodnoty porovnávacích svarů

Č. vz.	V _D	V _S	I	U	z	r	v	m	P _N	P _S	E _Z	E _N	E
311	13,40	0,836	405	28,2	5,16	0,5	8,88	0,58	21,35	40,77	0,584	0,875	0,511
431	13	0,68	367	28,3	4,76	0,92	8,9	0	22,72	45,13	0,54	0,95	0,51

Na (Obr. 78, 79) vidíme porovnání optimálních svarů práce [2] a optimálního svaru této diplomové práce, umístění optim viz. Graf č. 8 Je patrné, že optimální svar s mezerou má menší převýšení a hlubší závar. To se projevilo ve vyšší hodnotě efektivity závaru E_z , naopak efektivita návaru E_n musí být nižší i přes nižší převýšení, protože plocha návaru v mezeře je vždy ztrátová. Takže ve výsledku je hodnota celkové efektivity téměř shodná.

3.5 Kontrola jakosti svaru

Optimální geometrie svaru (maximální efektivita provedení) nemusí vždy znamenat automatické zajištění potřebné jakosti. Kvalitu svaru je nutno posuzovat z více hledisek a v souladu s příslušnými normami. [12]

Pro použitý základní materiál - ocel S275JR a přídatný materiál OK Aristorod 12.50 se dá předpokládat, že ve struktuře svarového kovu ani v TOO nebudou vznikat strukturní složky s nevyhovujícími plastickými vlastnostmi. To potvrdilo i měření mikrotvrdosti v přechodu mezi svarem, hranicí ztavení a teplem ovlivněným pásmem v disertační práci [1].

Vzhledem k extrémní snaze o dosažení co největšího podílu závaru na nosné velikosti svaru je nutno pozornost zaměřit na geometrická kritéria provedení svaru. Klasifikaci určování stupňů jakosti a vad uvádí platná norma ČSN EN ISO 5817.

Při posuzování jakosti svarů byla s ohledem na polohu hořáku vůči pásnici svírající úhel pouhých 30° (z důvodu nasměrování hořáku do mezery) zaměřena pozornost na strmý přechod svaru.

Tato domněnka se potvrdila u několika svarů u nichž byl proces s vyšším odtavovacím výkonem, kde již nastavená mezera při sestavení byla příliš malá na to, aby do ní zatekl natavený materiál z plochy převýšení, která má vliv na hodnotu strmého přechodu svaru vůči pásnici

Svary s touto vadou podle citované normy byly tak z konečného hodnocení vyloučeny. Ostatní vady byly v souladu s požadavky na jakost svaru.

4. ZÁVĚR DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tato práce se zabývá vlivem mezery v kořeni koutového svaru na jeho efektivitu provedení. V rámci tohoto cíle byl vyřešen i dílčí problém s přesností směřování maximálního závaru svaru do mezery mezi stojnou a pásnicí, bez jehož vyřešení by sledování vlivu mezery nemělo smysl.

Bylo zjištěno, že pokud zajistíme přesné směřování maximálního závaru do mezery, tak nám metoda plánování experimentů umožní nalézt rozmezí hodnot mezer, ve kterém má mezera pozitivní vliv na efektivitu provedení svaru. To znamená, že v určitém režimu svařování umožní dostatečně hluboký závar, ve kterém zároveň zmizí přebytek návarového kovu, který by jinak vytvořil neproduktivní převýšení svaru. Tento efekt využívaný u tupých svarů se u koutových svarů dosud nevyužívá.

Tato práce poskytuje nejen metodiku ale i dostatek technologických informací k využití mezery v kořeni koutového svaru jako dalšího faktoru ke zvýšení efektivity a produktivity svařování metodou MAG. Je to cesta, jak úplně nahradit neefektivní výplňové koutové svary tupými „T“ závarovými svary bez nutnosti vytváření úkosu a snížit tak velké náklady, které jsou s touto problematikou spjaté.

5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HUDEC, Z.: Optimalizace konstrukčních a technologických parametrů koutových svarů zhotovených metodou MAG, [dizertační práce], TU Liberec 2005.
- [2] Hrstka, D.: Vliv směsi plynu na efektivitu provedení svaru a stabilitu procesu MAG.[Diplomová práce]. Liberec 2007. TU Liberec, FS.
- [3] ONDREJČEK, P.: Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou. Bratislava 2003.
- [4] KOPŘIVA, R.: Technológia zvárania v ochranných plynach metódou MIG/MAG.Ostrava, ZEROSS 1993.
- [5] KONVALINA, M.: Porovnání efektivit MAG svařování trubičkovými a plnými dráty. [Diplomová práce]. Liberec 1998. TU Liberec, FS.
- [6] The Physics of Welding, ed. J.F.Lancaster, Oxford, Pergamon Press,1986.
- [7] HUDEC,Z.: Intenzita svařování MAG. SDSM 5/2004.
- [8] SAMEK,E.,STRINKA,R., Zváranie v ochrannej atmosfére taviacou sa elektródou. 1.vyd. Vydalo ALFA Bratislava a SNTL Praha, 1982, 248 s.
- [9] HUDEC, Z.: Od “overweldingu” k technologičnosti svařence. TM - SDSM 3/2004.
- [10] BLODGETT, O.W.: Design of Weldments. 8th ed., Cleveland (Ohio): The James F.Lincoln Arc Welding Foundation, 1976
- [11] BELAVENDRAM, N.:Quality by Design, Prentice Hall International, 1995
- [12] ČNI, ČSN EN ISO 5817, 2004
- [13] HUDEC, Z.: Optimalizace procesu svařování MAG. SDSM 5/2004, ISSN 1212- 4044
- [14] ŠPEJRA, R.: Vliv přenosu tepla ve svarové lázni při svařování MAG koutového svaru na efektivitu jeho provedení.[Diplomová práce]. Liberec 2007. TU Liberec, FS.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 25.5.2007

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date

Signature